

Evaluación mediante imágenes estereoscópicas hemisféricas de tratamientos selvícolas en sistemas forestales restaurados. El caso del Parque Nacional de Sierra Nevada



Nuria Simón Cid

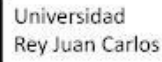
Trabajo de Fin de Máster

Tutores institucionales:

Dr. Fernando Montes Pita y Dra. Mariola Sánchez González

Tutor académico:

Dr. José María Rey Benayas



Trabajo de Fin de Máster
Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

**Evaluación mediante imágenes estereoscópicas hemisféricas de tratamientos
selvícolas en sistemas forestales restaurados.**
El caso del Parque Nacional de Sierra Nevada

Tutores institucionales:

Dr. Fernando Montes Pita (Instituto Nacional de Investigación y
Tecnología Agraria y Alimentaria)

Dra. Mariola Sánchez González (Instituto Nacional de Investigación
y Tecnología Agraria y Alimentaria)

Tutor académico:

Dr. José María Rey Benayas (Universidad de Alcalá)

En Madrid, a 2 de septiembre 2.013

D. Fernando Montes Pita

CERTIFICA:

Que el trabajo titulado: ***‘Evaluación mediante imágenes estereoscópicas hemisféricas de tratamientos selvícolas en sistemas forestales restaurados. El caso del Parque Nacional de Sierra Nevada’***, ha sido realizado bajo mi dirección por la alumna D^a Nuria Simón Cid.

En Madrid, a 2 de Septiembre de 2.013

Firmado:

D^a. Mariola Sánchez González

CERTIFICA:

Que el trabajo titulado: *‘Evaluación mediante imágenes estereoscópicas hemisféricas de tratamientos selvícolas en sistemas forestales restaurados. El caso del Parque Nacional de Sierra Nevada’*, ha sido realizado bajo mi dirección por la alumna D^a Nuria Simón Cid.

En Madrid, a 2 de Septiembre de 2.013

Firmado:

D^a. José María Rey Benayas

CERTIFICA:

Que el trabajo titulado: *‘Evaluación mediante imágenes estereoscópicas hemisféricas de tratamientos selvícolas en sistemas forestales restaurados. El caso del Parque Nacional de Sierra Nevada’*, ha sido realizado bajo mi autorización académica por la alumna D^a Nuria Simón Cid.

En Madrid, a 2 de Septiembre de 2.013

Firmado:

ÍNDICE

ABSTRACT	1
RESUMEN	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Antecedentes	3
1.1.1 LA ESTRUCTURA FORESTAL	3
1.1.2 MEDICIÓN DE LA ESTRUCTURA FORESTAL A PARTIR DE IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS	4
1.1.3 EL PARQUE NACIONAL DE SIERRA NEVADA	9
1.2 Justificación	11
2. OBJETIVOS.....	13
3. MATERIAL	14
3.1 Desarrollo de la metodología de análisis de imágenes estereoscópicas	14
3.2 El caso de estudio del Parque Nacional de Sierra Nevada	16
4. METODOLOGÍA	20
4.1 Obtención de variables dasométricas a partir de imágenes estereoscópicas	20
4.1.1 PROCESO DE VISIÓN ESTEREOSCÓPICA	20
4.1.1.1 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES Y GEOMETRÍA DEL SISTEMA	22
4.1.1.2 TRATAMIENTO DE IMÁGENES.....	22
A. Método semiautomático de segmentación y correspondencia	24
B. Método automático de segmentación y correspondencia	24
4.1.1.3 CÁLCULO DE LA DENDROMETRÍA.....	25
4.1.2 DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN DESARROLLADA EN MATLAB® DE ANÁLISIS DE IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS HEMISFÉRICAS	28
4.2 Estructura, composición de especies y estado sucesional de la masa.....	31
4.2.1 ÍNDICES DE ESTRUCTURA DE LA MASA	31
4.2.1.1 PATRÓN ESPACIAL	31
4.2.1.2 DIFERENCIACIÓN	32
4.2.1.3 VARIABILIDAD DIAMÉTRICA	33

4.2.1.4 COBERTURA.....	33
4.2.2 COMPOSICIÓN DE ESPECIES.....	34
4.2.2.1 DIVERSIDAD DE ESPECIES	34
4.2.2.2 TIPO DE SEMILLA	35
4.2.2.3 FORMA DE VIDA	35
4.2.3 REGENERACIÓN DE LA ENCINA	36
4.3 Tratamiento estadístico de los datos	36
5. RESULTADOS.....	37
5.1 Comparación de métodos de análisis de imágenes	37
5.2 Estructura, composición y estado sucesional de la masa	42
5.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA DE LA MASA	45
5.2.2 COMPOSICIÓN DE ESPECIES.....	46
5.2.3 REGENERACIÓN DE LA ENCINA	49
6. DISCUSIÓN.....	51
6.1 Análisis de imágenes estereoscópicas	51
6.2 Efectos de los tratamientos selvícolas en la estructura, composición y estado sucesional de la masa.....	52
6.3 Líneas de investigación futuras	58
7. CONCLUSIONES.....	59
8. BIBLIOGRAFÍA	60
9. ANEXOS	
9.1 ANEXO I: Características técnicas del Forestereo I y II.....	I
9.2 ANEXO II: Ejemplo de procesamiento de imágenes de <i>ForeStereo</i>	II
9.3 ANEXO III: Fotografías	III

ABSTRACT

Pine plantations in Sierra Nevada National Park exhibit some serious ecological problems due to high tree densities and lack of silvicultural management during the early stages of growth. In this paper we evaluate the effects of different thinning regimes on the structure, composition and regeneration of deciduous trees in experimental plots of pine, mainly *Pinus halepensis* L. in order to characterize forest structure, a new methodology has been developed and tested to obtain tree position and stem diameter from stereoscopic hemispherical images taken using the measurement system MU2005-01738 developed at the INIA. The information obtained through these images facilitates the calculation of indices related to spatial pattern, differentiation, diametric diversity and coverage of forestry stands. Species diversity and regeneration were characterized from floristic inventories. The results indicate that in the process of estimation of the structural variables of the trees by analyzing the images taken, the identification of homologous trees based on the region-growing approach from a point selected by the user, is more accurate than the result obtained through automatic classification of each pixel of the image. Furthermore, the results from the indices calculated reveal that thinning plays a key role in the dynamics of structural diversity, increasing the spatial heterogeneity of stands and contributing to the restoration of successional dynamics and diversity of the studied plantations.

RESUMEN

Los pinares de repoblación del Parque Nacional de Sierra Nevada presentan graves problemas ecológicos debido al exceso de densidad y a la falta de actuaciones selvícolas durante las primeras etapas de crecimiento de los árboles plantados. En este trabajo se evalúan los efectos de tratamientos de claras con diferentes intensidades en la estructura, composición y regeneración de especies de frondosas en parcelas experimentales de pino, principalmente de *Pinus halepensis* L. para la caracterización de la estructura se ha desarrollado y testado una nueva metodología que permite obtener la posición y diámetro de los pies a partir de fotografías estereoscópicas hemisféricas tomadas con el sistema de medición MU2005-01738, el cual ha sido desarrollado en el INIA. La información obtenida a partir de estas imágenes permitió calcular índices de patrón espacial, diferenciación, diversidad diamétrica y cobertura de las masas forestales. La diversidad de especies y la regeneración se caracterizaron a partir de inventarios florísticos. Los resultados indican que, en el proceso de estimación de variables estructurales de los árboles mediante el análisis de las imágenes tomadas, la identificación de árboles homólogos basado en el método de “*region growing*” a partir de un punto seleccionado por el usuario, es más precisa que la obtenida mediante clasificación automática de todos los píxeles de la imagen. Por otro lado, los índices obtenidos muestran que los tratamientos con claras juegan un papel clave en la dinámica de la diversidad estructural, aumentando la heterogeneidad espacial y contribuyendo a restablecer la dinámica sucesional y la diversidad de las masas de repoblación estudiadas.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

1.1.1 LA ESTRUCTURA FORESTAL

La biodiversidad se ha convertido en uno de los principales retos en la gestión y conservación de las masas forestales tanto en el ámbito político como administrativo desde la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro (1992), como se refleja en el Convenio de Diversidad Biológica de las Naciones Unidas (www.un.org/es)

La biodiversidad es un término abstracto y de difícil definición que engloba toda clase de variedad natural, desde diversidad de comunidades a nivel de paisaje (diversidad γ), diferencias entre comunidades (diversidad β) y diversidad de especies dentro de una comunidad (diversidad α) (Whittaker, 1977), hasta diversidad genética. A su vez en los ecosistemas forestales puede determinarse en base a tres componentes: la composición, estructura y función (Del Río *et al.* 2003 y McElhinny *et al.* 2005). Cada aspecto de la diversidad requiere de sus propios indicadores sin que haya un único índice de diversidad que recoja completamente los complejos patrones inherentes a todo sistema natural (Peet, 1974 y Gavilán & Rubio, 2005). En la mayoría de los Inventarios Forestales Nacionales la captura de información se centra en la obtención de indicadores relativos a la composición y a la estructura, debido a la facilidad de medición y a la objetividad de los datos obtenidos. Concretamente, la estructura es un buen indicador de la biodiversidad del sistema y es fácilmente modificable a través de la silvicultura, por lo que su adecuado conocimiento es indispensable para garantizar una gestión sostenible (Montes *et al.* 2005 y Gavilán & Rubio, 2005). La estructura de una masa forestal está condicionada en gran medida por las características de las especies que vegetan en la zona, como su temperamento, crecimiento, tipo de copa, etc., así como por las características de la estación, la historia de la masa y el tratamiento selvícola. La estructura es, por lo tanto, el resultado de muchos procesos que representan un estado momentáneo de la dinámica de la masa (Weber, 2000).

La estructura de la masa forestal ha ido cobrando cada vez una importancia mayor en la comprensión y manejo de los ecosistemas forestales (Montes *et al.* 2004) ya que

resulta ser un buen indicador de la composición y funcionamiento del ecosistema al proporcionar información sobre los diferentes procesos que tienen lugar en cada etapa del ciclo de desarrollo de la masa forestal y sobre el hábitat de las diferentes especies de animales y plantas (Murdoch *et al.* 1972 y Degraaf *et al.* 1998). Los aspectos más relevantes de la estructura forestal son: la distribución del arbolado; la composición específica tanto en diversidad de especies como su distribución en el rodal; y la diferenciación en diámetro, altura y tamaño de los diferentes estratos verticales (Del Río *et al.* 2003).

El efecto de los tratamientos selvícolas en la estructura forestal ha sido ampliamente estudiado en masas de origen natural con diferentes tratamientos de regeneración (Montes *et al.* 2005 y Barbeito *et al.* 2009) y bajo distintos regímenes de claras (Montes *et al.* 2004). En este trabajo se analiza el efecto de diferentes intensidades de claras en la estructura de la masa en repoblaciones forestales caracterizadas por una alta densidad, baja diversidad arbórea y diferente composición específica que los bosques naturales, donde la intervención selvícola supone una importante herramienta de conformación de la estructura del ecosistema. Para ello ha sido necesario desarrollar una metodología para caracterizar la estructura forestal a partir de imágenes estereoscópicas hemisféricas.

1.1.2 MEDICIÓN DE LA ESTRUCTURA FORESTAL A PARTIR DE IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS

En 2005, el Centro de Investigación Forestal Español (CIFOR) integrado en el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) patentó el dispositivo de medición de bosques MU2005-01738.

El dispositivo de medición MU2005-01738 se basa en los principios de la visión estereoscópica o estereoscopía¹ y la fotogrametría, que se aplican a imágenes omnidireccionales o hemisféricas obtenidas mediante una lente tipo “ojo de pez” (con apertura de campo de 180°). Este sistema permite obtener datos dendrométricos de los fustes, la posición en el espacio de los elementos medidos e información sobre el dosel.

¹ La **estereoscopía** es una técnica utilizada para la recuperación de las coordenadas tridimensionales de un número de puntos de la escena, a partir de al menos dos imágenes bidimensionales tomadas desde distintas perspectivas (Torres, 1998).

De esta forma, es posible adquirir una gran cantidad de información sobre la estructura y estado de la masa fundamental para la gestión forestal, especialmente en masas densas, en las que el LIDAR y la teledetección no dan información detallada de la estructura en el interior de la masa. Esta información se obtiene de una manera más económica y con un mayor rendimiento en campo que mediante los habituales métodos de inventario tradicionales, con lo que se consigue una mayor intensidad de muestreo en grandes extensiones y en el tiempo (Montes *et al.* 2010).

La empresa “Consultoría Ferroviaria y Medioambiental, S.L” desarrolló para el INIA un prototipo del dispositivo de medición, adaptado para una cámara digital Nikon® Coolpix® con una lente de “ojo de pez” del tipo FC-E8 (Fig. 1).



Fig. 1 1^{er} prototipo del sistema de medición estereoscópico (*ForeStereo I*)

En base a la fabricación del 1^o prototipo del dispositivo de medición (*ForeStereo I*) se realizaron dos estudios paralelos que contribuyeron a la implementación del software mediante:

1. El desarrollo del proceso de segmentación y correspondencia en entornos forestales para dos tipos de imágenes omnidireccionales obtenidas con lentes de ojo de pez y con características diferentes: a) alta variabilidad de la intensidad en los troncos en función de la incidencia del sol y b) imágenes con pobre iluminación y alto contraste entre el cielo y los troncos en la parte central (Herrera, 2010). Las imágenes utilizadas en este trabajo se tomaron en el marco del proyecto de investigación: “*Caracterización espacial de las áreas de*

ecotono entre pinar de Pinus sylvestris L. y rebollar de Quercus pyrenaica Willd. en el sistema Central. Implicaciones selvícolas para la conservación de la biodiversidad”, AGL 2004 1941.

2. El desarrollo de un método de medición de variables dendrométricas ‘distancia’ y ‘diámetro’ para la cubicación de parcelas de *Eucalyptus globulus* Labill. utilizando pares estereoscópicos de imágenes hemisféricas obtenidos mediante el dispositivo de medición MU2005-01738 (Rodríguez, 2010). Este estudio se realizó en el ámbito del proyecto de investigación “*Mejora de la producción bajo estrés en Eucalyptus globulus Labill.*”, AGL 2006 0788.

En el año 2011 se inicia el **Proyecto de Investigación de Parques Nacionales 161/2010**, en el que se enmarca el presente **Trabajo de Fin de Máster**. El **objetivo general de este proyecto se centra en el desarrollo de una nueva metodología para el seguimiento del estado y dinámica de la diversidad estructural de la masa forestal, utilizando información derivada de los pares estereoscópicos de imágenes hemisféricas tomados mediante el dispositivo de medición MU2005-01738**. En el marco de este proyecto surge la fabricación del 2º prototipo (*ForeStereo II*) (Fig. 2) a partir de la experiencia adquirida con el trabajo de campo y el análisis de imágenes obtenidas con el 1º prototipo. Este 2º prototipo se utiliza en dos líneas de investigación desarrolladas en el ámbito de este proyecto: 1) la caracterización de los hábitats en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y 2) el estudio del efecto de los tratamientos selvícolas en la estructura de la masa forestal en el Parque Nacional de Sierra Nevada, este último objeto de estudio de este Trabajo de Fin de Máster. **El Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivos, en primer lugar, identificar la estrategia de medición de variables dasométricas y dendrométricas más adecuada para caracterizar la estructura forestal, utilizando para ello imágenes tomadas con el *ForeStereo I* en parcelas en las que se han medido y localizado todos los pies, y en segundo lugar, utilizar esta misma estrategia de medición para caracterizar la estructura forestal a partir de un muestreo llevado a cabo con el *ForeStereo II* en parcelas de ensayo con distintas intensidades de clara en Sierra Nevada para analizar el efecto del tratamiento selvícola en diferentes aspectos de la estructura y diversidad de la masa forestal.**



Fig. 2 2º prototipo del sistema de medición estereoscópico (*ForeStereo II*).

Hoy en día, el dispositivo de medición cuenta con los siguientes elementos:

1. Un **dispositivo físico** compuesto por un sistema de captación de dos imágenes estereoscópicas hemisféricas tomadas a una distancia conocida y alineadas en una dirección identificable en las imágenes, siendo además los ejes ópticos paralelos.
2. Un **software** que analiza y procesa imágenes estereoscópicas hemisféricas de la masa forestal. Se han desarrollado técnicas de medición de variables dendrométricas a partir de las disparidades² entre los píxeles correspondientes a cada uno de los árboles que aparecen en las imágenes. Esta aplicación se desarrolla en Matlab®.

La peculiaridad de este sistema de medición respecto al resto de sistemas estereoscópicos convencionales, se encuentra en la forma en la que el dispositivo de medición captura la escena y la proyecta sobre la imagen (Herrera, 2010), permitiendo determinar distancias desde el propio sistema a los objetos en la escena y de este modo, medir parámetros que se toman en el inventario forestal como la altura, el diámetro o la distancia de los árboles al punto de medición a partir de los cuales podemos estimar una serie de variables de interés tendentes al análisis y que ayuden a los gestores forestales a planificar, implementar y evaluar medidas de gestión.

² **Disparidades:** separaciones relativas de los objetos en las imágenes.

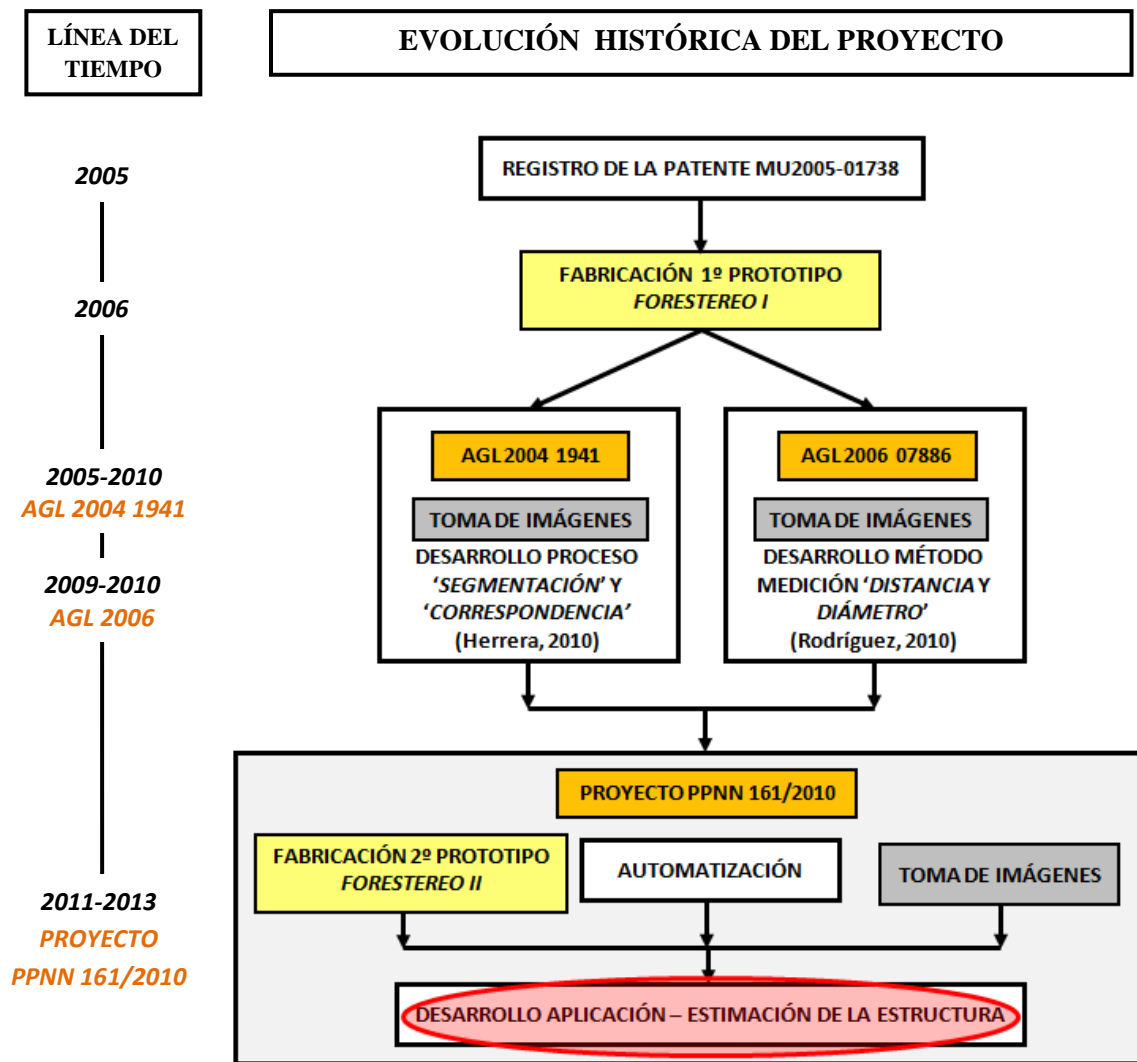


Fig. 3 Esquema del estado actual del conocimiento y su escala temporal. Los recuadros en naranja representan los proyectos de investigación en los que se tomaron las fotografías estereoscópicas hemisféricas de la masa forestal que han servido para desarrollar: 1) el proceso de segmentación y correspondencia (Herrera, 2010), 2) el desarrollo de un método de medición de distancias y diámetro (Rodríguez, 2010), y 3) el desarrollo de una aplicación para la estimación de la estructura de la masa forestal (objetivo del presente Trabajo Fin de Máster) señalado con un círculo rojo.

1.1.3 EL PARQUE NACIONAL DE SIERRA NEVADA

La mayoría de los ecosistemas forestales del mundo han sido modificados por la influencia humana (Ellis & Ramankutty, 2008), y en muchos casos la conservación de la biodiversidad depende de mantener paisajes transformados históricamente por prácticas tradicionales de uso del suelo y regímenes de perturbación naturales y antropogénicos (Foster, 2000). Inclusive, dentro de las áreas protegidas se encuentran sitios que han sufrido procesos de degradación que requieren ciertas intervenciones de manejo como medida para su restauración (Jardel, 2008).

Este es el caso del Parque Nacional de Sierra Nevada, un área protegida que mantiene una gran superficie forestal con una notable diversidad de especies y ecosistemas, sometida a una larga historia de influencia humana a través de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales y el uso del fuego (Camacho *et al.* 2002). Considerando estas condiciones, en el Parque Nacional de Sierra Nevada, se estableció un enfoque de restauración orientado a recuperar la superficie forestal perdida y minimizar la pérdida de suelo en áreas deforestadas, especialmente laderas, mediante la plantación de pinos de crecimiento rápido entre 1930 y 1980 (Bonet *et al.* 2010) (79 % de la cobertura forestal actual del parque (40.000 *Ha*)). La preparación del suelo en la mayoría de las plantaciones consistió en la formación de terrazas, donde se plantaron pinos de 1-2 años en ahoyado manual. *Pinus halepensis* Mill., fue la especie de pino más utilizada en las plantaciones de baja altitud (<1.300 *m s.n.m*) junto con *Pinus pinaster* Ait. debido a su tolerancia a la sequía mientras que los pinos montanos (*Pinus nigra* Arnold. subsp. *Salzmannii* Franco y *Pinus sylvestris* L.) fueron las especies más utilizadas en plantaciones a gran altitud (1.300-1.900 *m s.n.m*) algunas veces formando masas mixtas (Gómez-Aparicio *et al.* 2009). Los pinares fueron considerados una etapa de sucesión intermedia entre los arbustos de transición y la comunidad de árboles maduros, y por tanto, se asumió que facilitaban la introducción de caducifolios de sucesión tardía (Barbéro *et al.* 1998; Zavala *et al.* 2000; Maestre, 2002; Pausas *et al.* 2004 y Gómez-Aparicio *et al.* 2009). Sin embargo, como en la mayoría de las iniciativas de reforestación no se realizó un seguimiento a la gestión o monitoreo posterior para comprobar en qué medida las plantaciones promovían con éxito la recuperación de la vegetación nativa (Gómez-Aparicio *et al.* 2009), es decir, bosques dominados por la encina *Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp. (especie

perennifolia) y melojo, *Quercus pyrenaica* Willd. (especie caducifolia) acompañado de otras especies de árbol caducifolias tales como el *Acer opalus* subsp. *granatense* (Boiss.) Font Quer & Rothm y *Sorbus aria* (Pérez-Raya *et al.* 2001).

En la actualidad estos pinares de repoblación presentan graves problemas ecológicos. El exceso de densidad y la falta de actuaciones selvícolas durante las primeras edades de los árboles han originado unas masas monoespecíficas, coetáneas y de porte ahilado. La excesiva competencia por agua, luz y nutrientes no ha permitido el desarrollo de un sotobosque adecuado ni la colonización de otras especies forestales bajo el dosel arbóreo. Todo ello se traduce en una gran vulnerabilidad ante posibles perturbaciones y en una oferta de servicios ecosistémicos más limitada de lo que cabría esperar en un bosque natural. Es por ello que en las últimas décadas la administración forestal ha tratado tanto de mejorar sus condiciones frente a posibles incendios como de favorecer su naturalización y diversificación estructural y florística. También ha invertido un gran esfuerzo en la restauración de zonas incendiadas (Aspizua *et al.* 2012).

Hoy día, este ecosistema está siendo reemplazado por vegetación natural más resiliente y mejor adaptada a las características naturales del paisaje gracias a actuaciones de gestión adaptativa (claras, clareos y rozas) que están conduciendo estos bosques artificiales a un estado más natural (Bonet *et al.* 2010). Asimismo se está llevando a cabo la evaluación de la respuesta de los pinares de repoblación a las actuaciones realizadas para fomentar la diversidad tanto florística como estructural del ecosistema, su resiliencia, y su capacidad para proporcionar servicios ambientales (Aspizua *et al.* 2012).

A un nivel más concreto, se evalúa la incidencia de:

- La intensidad de los tratamientos realizados en el crecimiento y regeneración de la especie principal, el reclutamiento de especies, el aumento de la diversidad florística y de la diversidad espacial (estructura vertical), la supervivencia tras los tratamientos y los posibles efectos sobre el control de las plagas.
- El efecto de la altitud, la exposición y la especie principal para un mismo tratamiento sobre las variables anteriores.

- El tipo de maquinaria empleada para la eliminación de los residuos realizada a efectos de regeneración de especies arbóreas, reclutamiento de otras especies y crecimiento/supervivencia del matorral acompañante.

La combinación de estos estudios sobre el historial de perturbaciones, la identificación de las características de estructura de la vegetación, composición de especies y de procesos como la regeneración natural y la sucesión, permiten entender mejor la respuesta del ecosistema a la influencia humana y definir qué patrones del paisaje y de la estructura resultan fundamentales para elaborar estrategias eficaces de gestión de estas plantaciones.

1.2 Justificación

El presente Trabajo Fin de Máster se realiza dentro del marco del Proyecto de Investigación *“Desarrollo de métodos de seguimiento de la diversidad estructural de los bosques utilizando imágenes hemisféricas: una nueva herramienta de monitoreo para la gestión forestal”* (Programas de Investigación en la Red de Parques Nacionales (2010), Organismo Autónomo de Parques Nacionales del MMAMRM. 161/2010). Las entidades que participan en este proyecto son: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (I.N.I.A), Centro Superior de Investigaciones Científicas (C.S.I.C), Universidad de Granada (U.G.R), Universidad Complutense (U.C.M), Universidad Politécnica de Madrid (U.P.M) y el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC).

Este proyecto se desarrolla en los Parques Nacionales de Ordesa y Monte Perdido y de Sierra Nevada. El paisaje forestal en estas zonas está formado por comunidades adaptadas a las condiciones ecológicas y climáticas de diferentes pisos altitudinales, por lo que estos bosques son especialmente sensibles a los efectos del cambio climático, que pueden alterar el área de distribución de las especies, la estructura de la masa y los procesos ecológicos que mantiene la alta diversidad de estos sistemas. En base a las características particulares de estos paisajes, el proyecto (161/2010) plantea el desarrollo de una nueva metodología para el seguimiento del estado y dinámica de la diversidad estructural de la masa forestal, utilizando la información derivada de los pares estereoscópicos de imágenes hemisféricas tomados mediante el dispositivo de

medición MU2005-01738, patente desarrollada por el equipo de investigación en el INIA. Este dispositivo proporciona una herramienta que permite obtener una gran cantidad de información sobre la estructura y estado de la masa, fundamental para la gestión forestal, especialmente en masas densas, en las que el LIDAR y la teledetección no dan información detallada de la estructura en el interior de la masa, de una forma más económica que el inventario tradicional. El proyecto cuenta con un equipo multidisciplinar, que desarrolla de forma coordinada los métodos de segmentación y correspondencia de las imágenes y las técnicas orientadas a la obtención de indicadores de la diversidad estructural a partir de las propias imágenes e identifica los procesos ecológicos implicados y los efectos del cambio climático en la dinámica de la masa, así como el diseño de soportes de divulgación basados en la visión estereoscópica que constituyen uno de los fundamentos del proyecto. En la actualidad, se han desarrollado dos prototipos del MU2005-01738 operativos para llevar a cabo inventarios forestales y el software para el procesado de las imágenes (véase Anexos I y II).

El presente Trabajo Fin de Máster pone su atención en una parte de dicho proyecto de investigación centrándose en la ***“Evaluación mediante imágenes estereoscópicas hemisféricas de tratamientos selvícolas en sistemas forestales restaurados. El caso del Parque Nacional de Sierra Nevada”***. Este estudio se lleva a cabo en colaboración con el *Programa de Seguimiento de Cambio Global del Parque Nacional de Sierra Nevada* (más información sobre proyectos y líneas de investigación en desarrollo del programa en <http://wiki.obsnev.es/>).

2. OBJETIVOS

Los objetivos principales del proyecto son: (1) desarrollar una metodología para la caracterización de la estructura de la masa forestal a partir de imágenes estereoscópicas hemisféricas y (2) evaluar los efectos de tratamientos selvícolas en la vegetación de pinares (*Pinus halepensis* Mill.) de repoblación en el Parque Nacional de Sierra Nevada, en particular los efectos de tratamientos de claras con diferentes intensidades en: (i) el estado y la dinámica de la diversidad estructural de la masa forestal, (ii) la composición de especies leñosas y (iii) el estado sucesional.

3. MATERIAL

Para conseguir estos objetivos, se utilizaron dos fuentes de información: 1) un dispositivo experimental de parcelas de las que se disponía de la localización espacial de los árboles y del inventario dasométrico de masas puras y mixtas de *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Lam. en el Sistema Central que permitió desarrollar y validar la metodología de obtención de datos dasométricos a partir de imágenes estereoscópicas para la caracterización de la estructura de la masa forestal, y 2) un segundo dispositivo experimental de parcelas de ensayo de claras en una masa de pinares de repoblación del Parque Nacional de Sierra Nevada con el objetivo específico de evaluar los efectos de los tratamientos selvícolas en la vegetación.

3.1 Desarrollo de la metodología de análisis de imágenes estereoscópicas

En la primera zona de trabajo encontramos masas puras y mixtas de bosques maduros de pino albar (*Pinus sylvestris* L.) y roble melojo (*Quercus pyrenaica* Lam.). Para caracterizar el área de estudio se establecieron 3 transectos altitudinales en el ecotono que forman las masas de estas dos especies, cada uno ellos situado en una localidad diferente del Sistema Central: Valsaín (Segovía), Rascafría (Madrid) y Hoyocasero (Ávila). En cada transecto se ubicaron 5 parcelas circulares de 25 m de radio ($1.963,5 \text{ m}^2$), proporcionalmente espaciadas entre sí en función del tamaño de la anchura total del ecotono (1.000-1.500 m). Del total de las 15 parcelas muestreadas, 11 parcelas se situaron en formaciones de masa mixta de *Pinus sylvestris* y *Quercus pyrenaica* y 4 en masas puras, 2 de *Pinus sylvestris* y 2 de *Quercus pyrenaica*. La masa forestal presenta un área basimétrica media (\pm desviación estándar) de $33,13 \pm 13,20 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{parcela}^{-1}$ y un número total de pies por hectárea de 141,0. Estas parcelas se establecieron en el marco del Proyecto **AGL 2004 1941** (Plan nacional de I+D+i 2004).

En cada una de las parcelas de muestreo se tomaron datos dendrométricos del *diámetro normal*, *altura total*, *altura de la primera rama viva*, *rumbo* y *distancia* al centro de la parcela (véase Tabla 1). La toma de datos se realizó durante los meses de abril a junio del 2005 y 2006. Para determinar el diámetro normal se tomaron para todos

los árboles mayores de 7,5 cm (diámetro mínimo inventariable) dos diámetros del árbol a la altura normal (1,30 m desde el nivel del suelo), uno en la dirección al centro de la parcela y otro perpendicular al mismo. En los árboles con diámetro inferior a 55 cm se utilizó la forcípula mientras que para los mayores de 55 cm se midió su perímetro a una altura de 1,30 m con la cinta métrica y después, se obtuvo su diámetro mediante la ecuación $D=P/\pi$, siendo P el perímetro medido y D el diámetro buscado. Asimismo, se midió con un Vertex la distancia al centro de la parcela y la altura, tanto del total como la correspondiente al primer verticilo completo de ramas vivas o altura de la primera bifurcación en una rama gruesa (con diámetro mayor a 7,5 cm). Por último, con una brújula Suunto se estimó el rumbo midiendo el ángulo que forma la dirección del árbol desde el centro de la parcela respecto al Norte magnético.

Tabla 1 Media y desviación estándar de los 5 parámetros selvícolas medidos en las parcelas de experimentación del proyecto de investigación AGL 2004 1941 (Plan Nacional de I+D+i 2004).

Variables	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>
Diámetro medio (cm)	32,5±15,3	12,5±4,7
Altura media (m)	18,3±6,9	10,2±4,0
Altura primera rama (m)	10,3±5,9	3,4±1,6
Nº pies totales (%)	36,4	63,6
Área basimétrica (%)	26,72	6,41

Diámetro medio o normal: diámetro del árbol medido a la altura de 1,30m.

Una vez finalizado el inventario de datos dasométricos de la masa forestal, se estacionó el dispositivo de medición **ForeStereo I** en el centro de la parcela y se tomó un par de imágenes estereoscópicas hemisféricas.

Cabe señalar que el tamaño de las parcelas utilizadas en este estudio (25 m) es idóneo para testar los métodos desarrollados para el análisis de las imágenes obtenidas con el *ForeStereo I*, ya que debido a la apertura de campo de 180° de la lente y la resolución de las imágenes, los árboles situados más allá de los 25 m se proyectan con unas dimensiones muy pequeñas, haciendo que su medición sea menos precisa (véase Rodríguez, 2010), por lo que son excluidos en el procesado de las imágenes.

3.2 El caso de estudio del Parque Nacional de Sierra Nevada

El segundo estudio se llevó a cabo en el término municipal de Dílar (Granada) en el Parque Nacional de Sierra Nevada (Andalucía, sureste de España) (Fig. 4). El clima es mediterráneo, caracterizado por fríos inviernos y cálidos veranos, con pronunciada sequía estival (julio-agosto). La precipitación se concentra principalmente en otoño y primavera. El rango altitudinal varía entre los 850 *m* s.n.m (sobre el nivel del mar) (punto más occidental) y los 3.398 *m* (punto más oriental, Pico Veleta 37° 03' 20" N, 3° 21' 00" O). La precipitación aumenta y la temperatura disminuye con la altitud (Pulido *et al.* 1982). La precipitación media anual es de 659,90 *mm* (Pezzi & García, 1978). La precipitación de invierno es principalmente en forma de nieve por encima de los 2.000 *m* de altitud (Castillo, 2000). La temperatura media anual es de 15°C (García *et al.* 2006). La zona se asienta sobre dolomías y calizo-dolomías, materiales permeables (Castillo, 2000). En la zona predomina la morfodinámica periglaciaria principal causa de la tasa deficitaria de humedad que albergan los suelos, especialmente durante aquellas épocas del año más propicias para el ciclo vital de las plantas (Gómez *et al.* 2013). Además, la complejidad orográfica de las montañas causa fuertes contrastes climáticos entre las laderas soleadas y secas de orientación sur y las laderas sombreadas y húmedas de orientación norte (Pezzi & García, 1978 y Gómez-Aparicio *et al.* 2009).



Fig. 4 Mapa de situación de las parcelas de experimentación dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada. En el margen derecho se encuadra el Parque Nacional de Sierra Nevada dentro de la Península Ibérica.

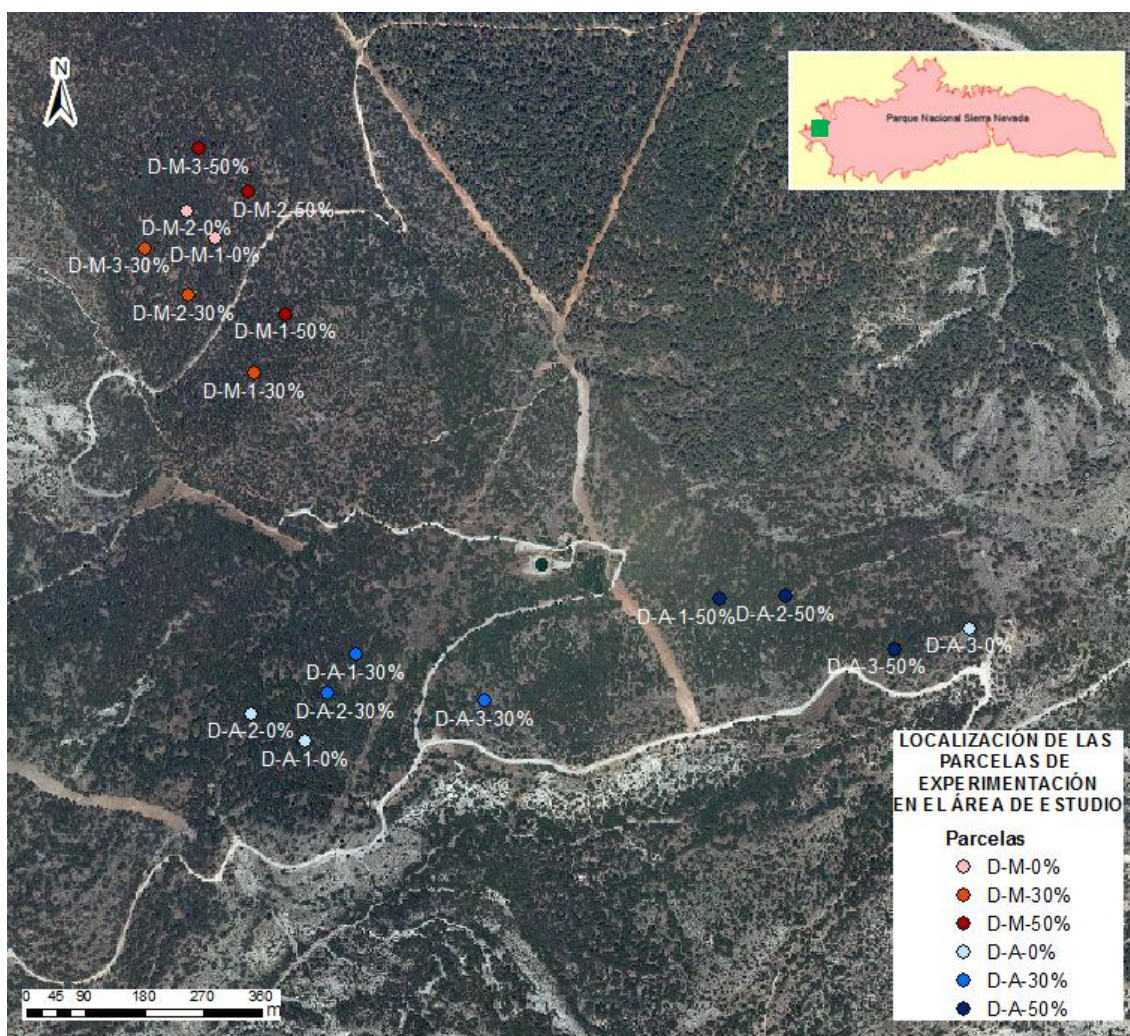


Fig. 5 Mapa de situación de las parcelas de experimentación en el área de estudio. El recuadro verde en el mapa superior indica la localización de la zona de trabajo dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada. Los puntos en la figura corresponden con la localización de las parcelas agrupadas por zonas (D-M: Dílar Medio, D-A: Dílar Alto) El porcentaje indica el peso de la clara.

Las parcelas elegidas se sitúan en la cara noroeste del Parque con una pendiente media de 15% y una altitud media de 1.350,5m. La vegetación de la zona se caracteriza por una masa de pinar densa de repoblación (años 1966-1969; Bonet *et al.* 2010) compuesta fundamentalmente de *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinaster* Ait., *Pinus nigra* Arnold. subsp. *salzmannii* Franco, y *Pinus sylvestris* L. (Tabla 2). El resto de especies de leñosas que encontramos no llegan a formar masas principales y suelen aparecer como especies acompañantes; entre ellas destacan la encina, *Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp., el majuelo, *Crataegus monogyna* Jacq., la jara blanca,

Cistus albidus L., la aliaga *Ulex parviflorus* Pourr., *Lavandula lanata* Boiss. y *Salvia Lavandulifolia* Vahl. En la zona se han llevado a cabo claras sistemáticas durante los meses de febrero a mayo de 2011.

Tabla 2 Características principales del área de estudio y datos dasométricos de las especies de pinos tomados inmediatamente después de la actuación selvícola (año 2011).

Zona	Tratamiento	Parcela	Pte (%)	Orientación	Altitud (m s.n.m)	Fcc (%)	Especie principal	N ($\text{pies}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Dg (cm)
Alto	control	1	15	Norte-Oeste	1378	90,7	<i>P. halep, P. sylv</i>	824	27,92
		2	20	Norte-Este	1376	92,3	<i>P. halep, P. nigr</i>	904	28,74
		3	30	Norte-Oeste	1461	66,2	<i>P. halep, P. nigr</i>	824	24,74
	30%	1	20	Norte-Este	1361	82,9	<i>P. halep</i>	764	22,18
		2	10	Norte-Oeste	1369	78,2	<i>P. halep</i>	560	28,22
		3	20	Norte-Oeste	1413	52,8	<i>P. halep, P. nigr</i>	128	27,85
	50%	1	30	Norte	1390	77,5	<i>P. halep, P. sylv</i>	576	29,40
		2	50	Norte	1396	80,0	<i>P. halep, P. nigr</i>	476	24,89
		3	30	Norte-Oeste	1453	71,3	<i>P. halep, P. nigr</i>	500	20,56
	control	1	20	Oeste	1253	82,3	<i>P. halep</i>	992	22,17
		2	15	Oeste	1240	87,0	<i>P. halep</i>	992	23,09
		3	40	Norte-Oeste	1301	76,1	<i>P. halep</i>	900	25,26
Medio	30%	2	30	Norte-Oeste	1254	73,3	<i>P. halep, P. pina</i>	800	23,85
		3	0	Norte-Oeste	1240	80,9	<i>P. halep</i>	800	24,73
	50%	1	40	Norte-Oeste	1289	62,8	<i>P. halep, P. pina</i>	384	24,75
		2	20	Norte-Oeste	1253	76,3	<i>P. halep</i>	396	25,56
		3	15	Norte-Oeste	1235	77,3	<i>P. halep</i>	392	28,56

Pte.: pendiente (%). Fcc.: Fracción de cabida cubierta (%). *P. halep.*: *Pinus halepensis*. *P. sylv.*: *Pinus sylvestris*. *P. nigr.*: *Pinus nigra*. *P. pina.*: *Pinus pinaster*. Dg.: diámetro cuadrático medio (cm).

La metodología puesta en marcha consistió en la localización de parcelas permanentes de seguimiento georreferenciadas, donde se han realizado varios tratamientos experimentales. Se establecieron dos zonas atendiendo a diferencias fundamentales en cuanto a altitud y tipo de suelo. En cada zona se realizaron tres réplicas (parcelas de 50x50 m (0,25 ha)) de cada uno de los tres tratamientos: intensidad de clara 0%, (control), 30% (clara moderada) y 50% (clara fuerte), utilizándose para este trabajo finalmente un total de 17 parcelas, 9 en la zona situada a mayor altitud (Dílar Alto, DA) y 8 en la zona situada a menor altitud (Dílar Medio, DM). Una parcela control fue eliminada al quedar invalidada por haber estado sometida a distintos tratamientos selvícolas. Cada parcela a su vez comprendía un total de 10 subparcelas de dimensiones 5x5 m (0,0025 ha) situadas aleatoriamente dentro de la parcela (Fig. 5).

En el centro de cada subparcela se estacionó el prototipo II del dispositivo de medición MU2005-01738, *ForeStereo II* y se tomó un par de imágenes estereoscópicas hemisféricas en mayo de 2012. En este estudio se han analizado también los datos del

inventario de especies leñosas llevado a cabo durante los meses de abril y mayo de 2011 y 2012 en el marco del proyecto Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada.

4. METODOLOGÍA

4.1 Obtención de variables dasométricas a partir de imágenes estereoscópicas

4.1.1 PROCESO DE VISIÓN ESTEREOSCÓPICA

La metodología que se lleva a cabo para la obtención de variables dasométricas a partir de imágenes estereoscópicas se basa en el proceso de visión estereoscópica (Herrera, 2010) y consta de los siguientes pasos (véase Fig. 6):

- a) **La adquisición de imágenes**, proceso por el cual se obtienen las dos imágenes del par estereoscópico, en nuestro caso, las imágenes con la proyección propia de los sistemas basados en lentes de ojo de pez.
- b) **La geometría del sistema** que determina las relaciones físico-geométricas del dispositivo y que define ciertos parámetros que afectan al proceso global de la visión estereoscópica.
- c) **La segmentación** que es el proceso de extracción de características³, extracción de propiedades de dichas características, y clasificación de texturas para su exclusión del proceso de correspondencia, es decir, consiste en asignar a cada píxel de la imagen una etiqueta que lo identifica como perteneciente a una determinada clase para su exclusión.
- d) **La correspondencia de características** es el proceso de emparejamiento de características homólogas de una imagen, con las de la otra imagen del par estereoscópico, que representan la misma entidad física en la escena 3D. Para lograr los emparejamientos, se aplican una serie de *restricciones*

³ Por **característica** dentro de una imagen se entiende un elemento significativo de la misma, pudiendo ir desde una región formando parte de una determinada textura hasta un píxel o incluso agrupaciones de píxeles siguiendo un cierto patrón. En cualquier caso, cada característica se describe por una serie de propiedades que la identifican frente al resto. Las características y sus propiedades, constituyen las muestras para el proceso de clasificación (Herrera, 2010).

estereoscópicas. Una vez establecida la correspondencia entre dos características, se determinan las ubicaciones en las imágenes de ambas características y de ahí, las separaciones relativas entre ellas, esto es, la *disparidad*. En las imágenes analizadas, estas separaciones se traducen en diferencias entre los dos ángulos que determinan las posiciones de las características en coordenadas polares.

- e) **Obtención de la estructura 3D de la escena.** A partir de las correspondencias entre características homólogas y por tanto sus disparidades, se determinan las distancias a las que se encuentran en la escena 3D las entidades representadas por dichas características utilizando parámetros conocidos y proporcionados por la geometría del sistema estereoscópico.

PROCESO GENERAL DE VISIÓN ESTEREOSCÓPICA

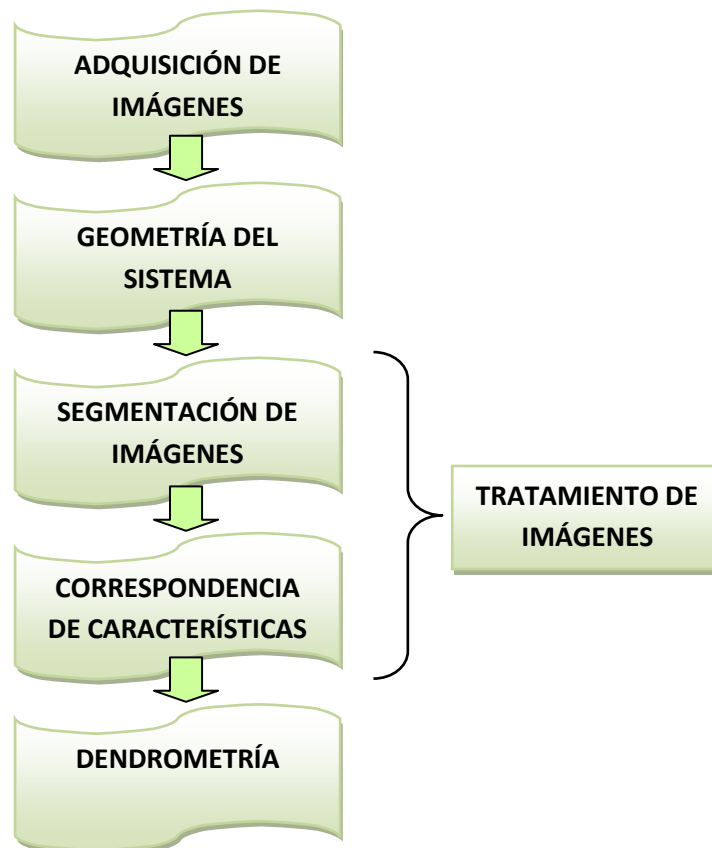


Fig. 6 Esquema del proceso de visión estereoscópica.

4.1.1.1 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES Y GEOMETRÍA DEL SISTEMA

El protocolo seguido en este estudio sobre la captura de las imágenes y la geometría del sistema se lleva a cabo de acuerdo a la metodología recogida en Herrera (2010) y Rodríguez (2010).

El dispositivo de medición se estaciona en el centro de la parcela de 25 m, colocando el soporte con la cámara sobre el trípode a una altura de aproximadamente 1,25 m y se nivela de modo que el eje óptico de la lente permanezca en posición vertical enfocando al cenit y la alineación del par estereoscópico tenga dirección Norte-Sur.

En el caso del primer prototipo, la primera imagen del par, digamos la izquierda del par estereoscópico, se obtiene situando la cámara en el extremo orientado al Sur geográfico de la guía de desplazamiento y la segunda imagen o imagen derecha del par se captura con la cámara situada en el extremo de la guía orientada al Norte, de manera que la distancia entre los ejes ópticos de la lente en ambas posiciones sea de 1,007. La apertura del objetivo y el tiempo de obturación se seleccionan en función de la densidad del dosel de copas y la luminosidad existente en el momento de la captura, de manera que la fracción de imagen sobreexpuesta sea inferior al 20%.

El segundo prototipo está provisto de dos cámaras separadas por una distancia de 0,80 m que permiten capturar ambas imágenes de forma simultánea, descargándose las imágenes directamente a un ordenador. El programa desarrollado ejecuta una secuencia de 4 pares de imágenes con diferentes tiempos de exposición, de forma que después se puede seleccionar aquel par con condiciones de iluminación óptimas.

4.1.1.2 TRATAMIENTO DE IMÁGENES

En este apartado se describe el planteamiento global de la estrategia encaminada al tratamiento de imágenes y que contempla dos procesos bien diferenciados, donde los troncos de los árboles constituyen el objetivo fundamental de la misma. Los dos procesos mencionados son: la *segmentación* y la *correspondencia*.

En cualquier imagen se encuentran presentes uno o varios objetos localizados en su entorno. El proceso de *segmentación* consiste en separar dichos objetos del medio en el que se encuentran y distinguirlos entre sí. Debido a la enorme dificultad de las imágenes

a tratar (entornos con gran variabilidad en las condiciones de iluminación y abundantemente poblados de hojas) y atendiendo a estudios previos (Herrera, 2010), se opta por utilizar técnicas basadas en el procesamiento de imágenes a nivel de píxel. Estas técnicas tratan de asignar el píxel a una clase determinada en función de sus propiedades específicas y las de los píxeles que le rodean. En este primer paso del tratamiento de imágenes se identifican y establecen métodos de exclusión que evitan que ciertas texturas, correspondientes al cielo, al suelo y a las hojas, intervengan en procesos posteriores, facilitando de este modo la correspondencia entre los píxeles que no han sido excluidos en el proceso de segmentación, aquellos pertenecientes a los fustes, objeto principal del proceso de correspondencia en nuestro caso de estudio, cuyo interés reside en medir las dimensiones y determinar la posición del árbol. La identificación de los fustes de los árboles y la exclusión del proceso de aquellas texturas que no intervienen en la medición de la masa forestal, constituye un objetivo prioritario, ya que permite minimizar los errores en las mediciones de interés (Herrera, 2010).

La *correspondencia* es el proceso de emparejamiento de los píxeles homólogos de los fustes entre ambas imágenes del par estereoscópico. Para llevar a cabo este emparejamiento se utilizan una serie de estrategias basadas en restricciones estereoscópicas que ayudan a limitar la búsqueda de correspondencias: *epipolaridad* (los posibles homólogos en la imagen derecha correspondientes a un determinado píxel en la imagen izquierda se encuentran en una curva denominada *epipolar*), *semejanza*, *unicidad* y *continuidad de la disparidad*. Para más información sobre las restricciones utilizadas en este estudio puede consultarse el trabajo de Herrera (2010).

La metodología empleada en los procesos de segmentación y correspondencia de características (píxeles, líneas o regiones) de las imágenes hemisféricas constituye el paso previo a la obtención del cálculo de las distancias de dichas características en la escena tridimensional. En concreto, **en este trabajo se comparan dos estrategias de segmentación y correspondencia generalizables para todo tipo de imágenes y desarrolladas en el marco del proyecto 161/2010 a partir de los métodos citados en Herrera *et al.* (2009) y Herrera *et al.* (2010): un primer método donde la identificación de los árboles se realiza de manera *semiautomática*, guiado por el técnico que maneja la aplicación, y un segundo método en el que la identificación de los árboles se hace de forma totalmente *automática*.**

A. Método semiautomático de segmentación y correspondencia

En el método semiautomático la clasificación inicial se realiza en un entorno de vecindad alrededor de un píxel identificado por el técnico como perteneciente al fuste del árbol en una de las imágenes. A partir de este momento se procede a la clasificación binomial (en dos grupos, uno correspondiente al fuste del árbol seleccionado y otro correspondiente al fondo) de los píxeles de dicho entorno. Los criterios que se utilizan para llevar a cabo dicha clasificación se obtienen utilizando un filtro de anisotropía en las direcciones radial y tangencial para la evaluación de los clasificadores basados en la *intensidad*, la *varianza del color* y la *proporción de verde relativa a la suma de los tres canales RGB*. Dicha clasificación se realiza en función del criterio clasificador que proporciona una varianza menor dentro de los dos grupos y mayor entre grupos.

Posteriormente, se realiza un proceso de crecimiento de regiones o “*region growing*” (Herrera, 2010) hacia la base y el ápice del árbol, estableciendo para ello unas restricciones geométricas basadas en la forma y orientación del fuste. Este mismo proceso se ejecuta en la otra imagen, tomando como partida un píxel identificado por el técnico como perteneciente a la proyección del mismo árbol en la imagen derecha.

En este método se ha desarrollado una estrategia de correspondencia de los píxeles homólogos en las dos imágenes basada en minimizar el error de epipolaridad del centro de la sección del tronco (seleccionando en la proyección del fuste en la imagen derecha, el píxel candidato más próximo a la línea epipolar), sujeto a restricciones en función de la diferencia en valor absoluto entre los diámetros estimados en 3D correspondientes a dichas secciones en cada una de las dos imágenes, y la diferencia de alturas y distancias entre secciones consecutivas.

B. Método automático de segmentación y correspondencia

En el método completamente automático se hace una segmentación inicial mediante una clasificación jerárquica de los píxeles, utilizando los cuatro criterios clasificadores citados anteriormente. La clasificación inicial se refina mediante la aplicación de los dos últimos criterios por sectores (la varianza del color y la proporción de verde relativa a la

suma de los tres canales RGB), para tener en cuenta los diferentes niveles de luminosidad en las diferentes áreas de la imagen.

Después los píxeles clasificados como pertenecientes a los fustes de los árboles se agrupan en árboles individuales mediante la aplicación de un muestreo de la imagen en circunferencias concéntricas, caracterizadas por ser $\delta = \text{cte}$ (véase Fig. 7). Dichas circunferencias cubren un rango de la imagen que va de δ máximo a δ mínimo y se encuentran separadas por un incremento de δ determinado que dependen de las características de la imagen. En este proceso se etiquetan como pertenecientes al mismo árbol las regiones formadas por píxeles clasificados como fuste que reúnen ciertas condiciones geométricas.

A continuación se lleva a cabo un proceso de correspondencia similar al descrito en el método anterior entre todos los pares de árboles identificados en la imagen izquierda y derecha que reúnen las condiciones para ser homólogos, obteniendo el error medio de epipolaridad y la diferencia media entre los diámetros estimados en 3D de las diferentes secciones de cada posible par de árboles. Por último, se identifican los árboles homólogos a partir de la determinación, entre todos los pares de homólogos posibles, de aquel que minimiza el error medio de epipolaridad y la diferencia media entre los diámetros estimados en 3D.

4.1.1.3 CÁLCULO DE LA DENDROMETRÍA

Una vez resuelta la correspondencia de un conjunto de puntos con sus homólogos en la otra imagen, se aplican métodos para reconstruir la posición de dichos puntos en la escena 3D usando las disparidades estimadas entre elementos y la información adicional sobre el sistema.

En este apartado, se describen los pasos necesarios para el cálculo de las distancias, diámetros y alturas siguiendo la metodología recogida en Rodríguez (2010).

En primer lugar, se determina la distancia reducida desde cada uno de los dos ejes ópticos de las imágenes (d_1 y d_2 respectivamente, véase figura 7) al centro de la sección medida del fuste del árbol. Estas distancias se calculan a partir de la longitud de la línea base (d') y el ángulo que forma en cada una de las imágenes el radio que pasa por el

centro de la sección con la línea base (α_1 y α_2). Estos últimos constituyen el núcleo del proceso de automatización ya que son los que se obtienen a partir de la correspondencia estereoscópica derivada de los procesos de segmentación y correspondencia de características (píxeles o regiones).

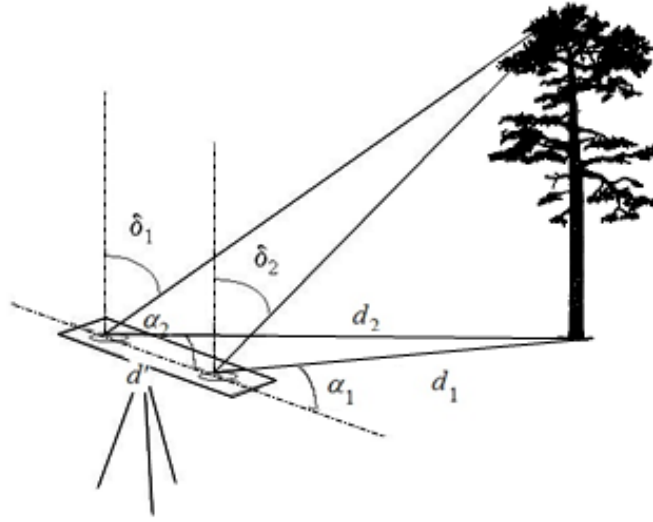


Fig. 7 Variables utilizadas para determinar la posición de un punto.

$$d' = d_1 \cdot \cos(\alpha_1) - d_2 \cdot \cos(\alpha_2) \quad d_2 \cdot \sin(\alpha_2) = d_1 \cdot \sin(\alpha_1) \quad (1 \text{ y } 2)$$

$$d_1 = \frac{d'}{\frac{\sin(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2)}{\sin(\alpha_2)} - \cos(\alpha_1)} \quad (3)$$

$$d_2 = \frac{d_1 \cdot \sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} \quad (4)$$

Los ángulos que forman la dirección del centro óptico de la lente al centro de la sección, respecto a la vertical, δ_1 y δ_2 , considerando que la distancia entre el punto y el centro de la imagen es d_{c1} y d_{c2} respectivamente, y dicha distancia es, por tratarse de una imagen captada por una lente de “ojo de pez”, proporcional al ángulo, vienen determinados por las siguientes expresiones:

$$\delta_1 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{d_{c1}}{r} \quad (5)$$

$$\delta_2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{d_{c2}}{r} \quad (6)$$

siendo r el radio de la imagen (correspondiente a un ángulo con la vertical de 90°).

Para la medición de diámetros y alturas de los árboles, conocidos el azimut α_I , el ángulo δ_I y la distancia que separa el centro óptico de la lente a un determinado punto del árbol, se consiguen las coordenadas polares de dicho punto, y por lo tanto, se puede determinar su posición. Calculando las distancias entre puntos, a partir de las imágenes, se obtienen las magnitudes reales de diámetros y altura.

Una vez identificados los troncos de los árboles y obtenida la correspondencia de los mismos, el sistema permite determinar la posición de los puntos que los definen en la escena tridimensional a partir de lo cual es posible obtener variables tales como el diámetro de los árboles, su altura, así como también, proporcionar información sobre la distribución espacial de los árboles y la estructura del dosel de copas (Montes *et al.* 2010). En nuestro caso, las variables de salida que se obtuvieron por cada sección j del árbol i , tras la correspondencia de puntos del par de imágenes estereoscópicas, fueron: la distancia reducida o proyección en el plano horizontal de la distancia del centro de la sección medida a cada una de las lentes d_{1ji} y d_{2ji} (m), la altura de la sección respecto a la altura de las lentes h_{ji} (m), el ángulo entre la línea base de cada imagen y la dirección horizontal a la que se encuentra el árbol α_{1ji} y α_{2ji} (radianes), el ángulo entre la vertical y la dirección del centro óptico de la lente a la sección medida δ_{1ji} y δ_{2ji} (radianes) y los diámetros D_{1ji} y D_{2ji} (m) de dicha sección calculado a partir de cada una de las imágenes mediante la ecuación:

$$D_{1ji} = 2 \left(d_{1j} / \cos(\delta_{1j}) \right) \text{sen} \left(\varepsilon_{1j} / 2 \right) \quad (7)$$

donde, ε_{1j} es el ángulo entre las visuales de los dos extremos de la sección al centro de cada imagen. Para limitar el error en la determinación del diámetro que se produce al

clasificar los píxeles, no se consideran las secciones de fuste de anchura proyectada inferior a 4 píxeles.

La altura de las secciones respecto de la base H se calcula a partir de h_{ji} , la altura de la lente y la pendiente del terreno. Para estimar la pendiente del terreno a partir de la información contenida en las imágenes se han desarrollado dos métodos, uno manual y otro automático, de ajuste de la pendiente, basados en el cálculo de la curva de intersección del plano de pendiente con el infinito. A partir de los diámetros y las distancias de las secciones medidas para los árboles identificados en las imágenes se lleva a cabo un procedimiento de filtrado de mediciones erróneas. Con las secciones finalmente clasificadas como no erróneas se ajustan ecuaciones de perfil que describen el grado de estrechamiento del diámetro con el incremento en altura del árbol y de este modo, definen la forma del fuste (Herrero, *et al.* 2005). En nuestro caso, se han utilizado ecuaciones de perfil lineales en las que el término independiente (a) es único para cada árbol i de la especie s , mientras que la pendiente (b) es la misma para todos los individuos de esa misma especie s :

$$D_{hi} = a_i + b_s H \quad (8)$$

donde, D_{hi} es el diámetro de la sección del árbol i , correspondiente a la altura h , y H es la altura desde el nivel del suelo hasta alcanzarse el diámetro D_{hi} . Estas ecuaciones permiten estimar el diámetro normal (**DBH** - *Diameter at Breast Height*) y el volumen del árbol (V).

4.1.2 DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN DESARROLLADA EN MATLAB® DE ANÁLISIS DE IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS HEMISFÉRICAS

El objetivo principal del desarrollo de un sistema de inventario forestal basado en las imágenes estereoscópicas hemisféricas obtenidas mediante el MU2005-01738 es poder estimar una serie de variables dendrométricas y dasométricas de interés en la gestión forestal con precisión suficiente y al menor coste. Para ello resulta imprescindible automatizar el procesamiento de las imágenes.

En este apartado se comparan dos estrategias de segmentación y correspondencia. En la primera de ellas, que denominamos *método semiautomático*, se requiere de la identificación guiada de los árboles homólogos en ambas imágenes, mientras que en la segunda, *método automático*, el proceso de identificación de los árboles y correspondencia entre las dos imágenes se hace de forma totalmente automática. Estas dos estrategias se han implementado mediante una aplicación con interfaz gráfica de usuario en Matlab® denominada *ForeStereo*, que además de incorporar los procesos de segmentación y correspondencia de las imágenes, integra también la estimación de variables dendrométricas y dasométricas. En el Anexo II se recoge un ejemplo de procesado de imágenes mediante ambos métodos. Desde el punto de vista de la aplicación del sistema para la realización de inventarios forestales, determinar la estrategia óptima para la obtención de los datos necesarios acerca de la estructura forestal supone un gran avance por el importante ahorro de costes que conlleva.

Por otro lado, la automatización desarrollada en este trabajo satisface la necesidad del diseño de una estrategia general con la perspectiva de su aplicación en el futuro a otros tipos de imágenes procedentes de otros entornos forestales, que si bien las imágenes puedan diferir puntualmente, de forma general planteen una problemática similar. De este modo, se consigue la adaptación de las estrategias propuestas a los nuevos entornos forestales con el mínimo esfuerzo en el futuro.

En el diagrama de flujo de la figura 8 se muestra el proceso de desarrollo de la aplicación para la obtención de las variables dendrométricas de interés.

ESQUEMA DEL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

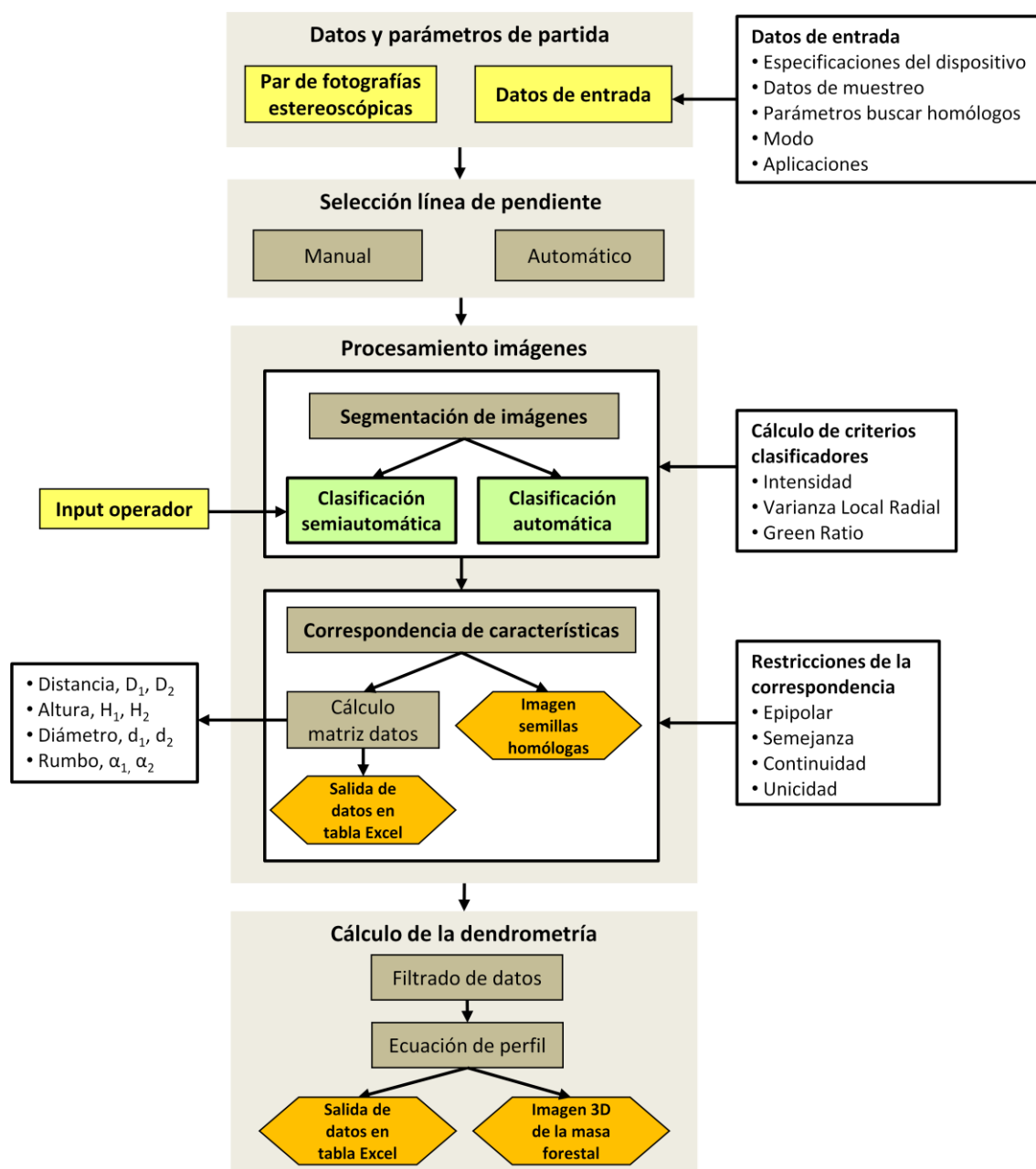


Fig. 8 Diagrama de flujo que muestra los pasos implicados en el desarrollo de la aplicación en Matlab® de análisis de imágenes estereoscópicas hemisféricas para el cálculo de la dendrometría mediante dos estrategias *método semiautomático* y *automático* (en recuadro verde). En recuadro amarillo se indican los datos de partida (*inputs*) y en forma romboidal, los resultados (*outputs*) que se obtienen durante el procesado de imágenes.

4.2 Estructura, composición de especies y estado sucesional de la masa

A partir del análisis de fotografías hemisféricas de la masa forestal del Parque Nacional de Sierra Nevada pertenecientes al año 2012 se obtuvieron el diámetro, la posición de todos los árboles y la fracción de cabida cubierta que se utilizaron para calcular los índices que permitieron caracterizar la estructura de la masa. Por otra parte, a partir de los datos del inventario de especies leñosas de años consecutivos (2011 y 2012) se obtuvo información sobre: la composición de especies y la regeneración de encina, especie acompañante de importancia en la sucesión ecológica.

4.2.1 ÍNDICES DE ESTRUCTURA DE LA MASA

4.2.1.1 PATRÓN ESPACIAL

La distribución espacial de los individuos de una masa está condicionada por las relaciones entre individuos (competencia, asociación), las estrategias de regeneración de las diferentes especies y las intervenciones selvícolas que se realizan en el rodal.

Muchos de los índices que se utilizan para describir la distribución espacial de los árboles resultan de gran utilidad para caracterizar la microestructura, es decir, la estructura que forma un árbol y los árboles más próximos.

Uno de los índices usado con más frecuencia para caracterizar la distribución espacial de los árboles es el **índice de agregación de Clark y Evans** (1954) que utiliza la distancia de un punto aleatorio a los árboles más próximos, comparando la distancia de cada árbol al vecino más cercano en la distribución real con la distancia esperada si los árboles estuvieran distribuidos de forma aleatoria; de esta forma se puede saber si la estructura tiende a la regularidad o los árboles forman agregados (Del Río *et al.* 2003).

El índice de Clark & Evans expresa la relación entre la distancia media al vecino más próximo (\bar{d}_i) observada y la distancia esperada si la distribución fuera aleatoria, que se calcula a partir de la densidad del rodal (λ):

$$CE = \frac{\bar{d}_{observada}}{\bar{d}_{esperada}} = \frac{\bar{d}_{observada}}{1/2 \cdot \sqrt{\lambda}}$$

En nuestro caso se consideró los 3 árboles más cercanos para su cálculo. Si el valor del índice es menor que 1 refleja una distribución con tendencia a agregados, si es igual o aproximado a 1 una distribución aleatoria o de Poisson, y si es mayor de 1 una distribución con tendencia a la regularidad hasta un valor máximo de 2,1491 (Del Río *et al.* 2003).

4.2.1.2 DIFERENCIACIÓN

El segundo aspecto de la estructura es la diferenciación, que describe la relación dimensional entre los árboles vecinos. La diferenciación se puede referir a distintas variables (diámetro, altura, copa, etc.), aunque para reflejar la diferenciación horizontal y vertical las variables más frecuentes son el diámetro y altura respectivamente. Uno de los índices de diferenciación de copas no espacial más utilizado es el **índice de diferenciación de Gadown** (Del Río, *et al.* 2003).

El índice de diferenciación da una cuantificación de la variación a nivel de microestructura (vecindad de un árbol), donde muchos procesos ecológicos tienen lugar (Montes *et al.* 2004). Este índice utiliza la posición relativa de los árboles en el rodal y se basa en la relación entre el árbol más delgado y el más grueso.

$$TD(n) = \frac{1}{N} \sum TDn_i \quad TD(n)_i = \frac{1}{n} \sum 1 - \frac{d_{min}}{d_{max}}$$

Donde, $TD(n)$ es el índice de diferenciación de la masa calculado con n vecinos, $TD(n)_i$ es el índice de diferenciación en diámetro del árbol i calculado con n vecinos, N es el número de árboles medidos por parcela, d_{min} y d_{max} son los diámetros normal menor y mayor (diferenciación horizontal) entre i y cada uno de sus n vecinos. Ya que la práctica habitual es tomar en consideración los tres vecinos más cercanos, n se establece en 3 para los cálculos. $TD(n)$ varía entre 0 y 1. Valores cercanos a 0 indican que los árboles vecinos son muy similares en tamaño al de referencia (regularidad), mientras que valores próximos a 1 indican una alta diferenciación (Neumann & Starlinger, 2001).

4.2.1.3 VARIABILIDAD DIAMÉTRICA

Cuanto mayor es el número de parcelas con mayores valores de variación de los diámetros presentes en cada parcela, mayor se puede considerar la biodiversidad estructural. La variabilidad diamétrica de las masas se puede calcular a través del **índice SQRI** para variables continuas.

El índice se basa en la suma de la raíz cuadrada de la diferencia absoluta entre cada valor y la media (Barbeito *et al.* 2009).

$$SQRI = \sum_{j=1}^n p_j \sqrt{|D_j - \bar{D}|}$$

Siendo, n es el número de árboles de la muestra, p_j es la relación entre el área basal de los j árboles y el área basal total de la parcela, D_j es el diámetro normal de los j árboles y \bar{D} es el promedio del diámetro normal de los árboles de la parcela.

4.2.1.4 COBERTURA

La cobertura del dosel desempeña un papel importante en la cantidad de luz solar que llega al suelo del bosque. Uno de los métodos utilizados para estimar la cobertura es la **Fracción de cabida cubierta** (F_{cc}) que permite determinar la dominancia de las especies o formas de vida.

Este índice de espesura cuantifica la parte de la superficie total del rodal que está cubierta por la proyección de las copas del arbolado. Se suele expresar indistintamente en tanto por ciento o en tanto por uno.

$$F_{cc} (\%) = \frac{(S_c \cdot 100)}{S_t}$$

Donde, S_c es la superficie cubierta por las copas en un rodal o parcela de superficie total S_t . Para estimar la F_{cc} se cuantificó la proporción de píxeles de la imagen estereoscópica clasificados como pertenecientes al cielo en un círculo determinado por $\delta < 57,5^\circ$. De este modo, sólo se considera la región de la imagen dentro del área limitada por el radio dado.

4.2.2 COMPOSICIÓN DE ESPECIES

4.2.2.1 DIVERSIDAD DE ESPECIES

Con los datos florísticos del inventario de leñosas disponible se han formulado diversas mediciones de la riqueza biológica a fin de descubrir la diversidad de especies de cada parcela. Los índices de diversidad utilizados en este trabajo han sido el índice de Shannon y el de heterogeneidad de Simpson y en ellos se integran simultáneamente el número de especies y la abundancia relativa de las distintas especies, de manera que su valor numérico aumenta conforme lo hace el número de especies. También, se ha tenido en cuenta la riqueza de especies.

Estos índices se basan en la presencia y proporción de las distintas especies en el ecosistema pero no tienen en cuenta su distribución espacial.

- **Índice de Riqueza**

La riqueza es el número de especies (N) presentes en el sistema; aumenta con la superficie de la parcela, siendo la incorporación de nuevas especies muy pequeña a partir de un cierto tamaño de parcela.

$$RI = N$$

- **Índice de Shannon**

El índice de Shannon también conocido como índice de Shannon-Wiener, mide el grado promedio de incertidumbre en predecir a que especie pertenecerá un individuo escogido al azar de una colección (Peet, 1974). Este índice contempla la cantidad de especies presentes en el área de estudio (riqueza de especies), y la cantidad relativa de individuos de cada una de esas especies (abundancia) viene dado por la expresión:

$$H' = - \sum p_i \cdot \log_2(p_i)$$

donde, p_i es la abundancia relativa de cada especie i (en número de individuos). Este índice aumenta con el número de especies presente en el rodal y toma mayores valores

cuando las proporciones de las distintas especies son similares (del Río *et al.* 2003). Se expresa con un número positivo. Adquiere valores entre cero, cuando hay una sola especie, y el logaritmo de S, cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos.

- **Índice de Simpson**

El índice de Simpson mide la probabilidad de que dos individuos de la población extraídos al azar sean de la misma especie ($\sum p_i^2$); valores altos indican dominancia de alguna especie. Para medir la diversidad se utiliza el complementario del índice de Simpson, ya que varía de 0-1 indicando valores próximos a 1 mayor diversidad:

$$1 - D = 1 - \sum p_i^2$$

El índice de Simpson aumenta con el número de especies y refleja a su vez el reparto de las especies en proporciones. Está fuertemente influido por la importancia de las especies dominantes (Peet, 1974).

4.2.2.2 TIPO DE SEMILLA

Se trata de un indicador de la diversidad y cobertura de dos grupos de especies: especies con semilla seca y especies con semilla carnosa, que suelen tener diferentes roles en la dinámica del bosque. Las relaciones se calculan a partir tanto del número de especies como del número total de individuos de todas las especies con uno u otro tipo de semilla por parcela.

4.2.2.3 FORMA DE VIDA

Se trata de un elemento caracterizador de la diversidad y densidad de dos grupos estructurales: árboles y matorrales. Las relaciones se calculan a partir tanto del número de especies como del número total de individuos de todas las especies con uno u otro tipo de forma de vida por parcela.

4.2.3 REGENERACIÓN DE LA ENCINA

El último de los criterios se refiere al origen de los pies de encina, principal especie que se está introduciendo en el pinar como consecuencia del proceso de sucesión ecológica. En este caso se realiza una clasificación de los pies en: brinzales (si proceden de semilla) y chirpiales (si proceden de brote de cepa o raíz) con el fin de estudiar los cambios existentes en la regeneración de la encina a partir de una perturbación marcada en el bosque como es el régimen de claras.

4.3 Tratamiento estadístico de los datos

Para evaluar el efecto de la zona y de las distintas intensidades de claras en la estructura de la masa forestal, la composición de especies y la sucesión ecológica se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) de dos factores (zona y tratamiento) para cada una de las variables analizadas en dos años consecutivos (2011 y 2012) por separado utilizando para ello el paquete estadístico SAS (Proc GLM, v.9.2 *SAS Institute Inc.* 2009). A continuación, las diferencias significativas entre zona, tratamiento o zona x tratamiento se analizaron mediante el contraste de medias de Tukey-Kramer con un nivel de significación de $\alpha=0,05$. En aquellos casos en que la interacción de los dos factores (zona x tratamiento) resultó significativa se utilizó la sentencia SLICE para separar las medias obtenidas, en función de las dos zonas y según la intensidad de la clara.

5. RESULTADOS

5.1 Comparación de métodos de análisis de imágenes

Se han comparado dos estrategias de análisis de imagen desarrolladas a partir del procesamiento de imágenes semiautomático y automático respectivamente. La comparación se ha llevado a cabo mediante el análisis de la precisión y el sesgo de la estimación a partir de las imágenes respecto a los datos tomados en campo para las variables distancia del árbol al dispositivo de medición y diámetro normal (*DBH*), que son las que se van a utilizar en el cálculo de los índices de estructura que centran el interés de este trabajo de fin de máster.

La intervención de un operario que determine qué punto de una imagen representa la misma entidad física en la otra imagen del par estereoscópico resulta clave en el proceso semiautomático, ya que elimina el error en la correspondencia, obteniéndose un mayor número de árboles correctamente identificados que son finalmente utilizados para ajustar las ecuaciones de perfil y estimar el diámetro normal.

Tabla 3 Evaluación del error medio de predicción (\pm desviación estándar) para cada una de las variables dendrométricas implicadas en el estudio. Los resultados se obtienen tras el procesamiento de imágenes semiautomático y automático. En paréntesis aparece el número de árboles de cada especie (*Pinus sylvestris* y *Quercus pyrenaica*) identificados con los datos control tomados en campo en un radio de 15 m alrededor del centro de la parcela.

Variables	Semiautomático		Automático	
	<i>P. sylvestris</i>	<i>Q. pyrenaica</i>	<i>P. sylvestris</i>	<i>Q. pyrenaica</i>
Distancia (m)	-0,28 \pm 0,97 (23)	0,25 \pm 0,26 (14)	-0,04 \pm 1,64 (13)	0,04 \pm 2,77 (14)
DBH (cm)	-3,46 \pm 4,50 (23)	-1,05 \pm 3,55 (14)	2,89 \pm 5,94 (13)	5,16 \pm 7,31 (14)

DBH (*Diameter at Breast Height*): diámetro normal que corresponde con el diámetro del árbol medido a la altura de 1,30 m.

El error medio obtenido (\pm desviación estándar) nos da una idea del sesgo en la estimación, es decir, si los valores estimados son sistemáticamente mayores o menores

que los valores medidos en campo. El sesgo en la estimación de la distancia es menor para las estimaciones efectuadas con el procesamiento de imágenes automático (Tabla 3), aunque ninguno de los dos procedimientos presenta un sesgo muy importante. En cuanto a la estimación del diámetro normal, las diferencias más significativas radican en que el procesamiento de imágenes semiautomático subestima el valor real de la variable medida en campo para las dos especies frente al automático que las sobrestima (véase Tabla 3 y Fig. 9). Esto se debe a que una de las restricciones impuestas en el método semiautomático el procedimiento de “*region growing*” se basa en la similitud entre los diámetros de secciones contiguas y por tanto, el ajuste posterior de las ecuaciones de perfil para la estimación del DBH tiende a subestimar las secciones del fuste situadas entre el punto del árbol identificado por el técnico y el suelo y a sobreestimar las secciones situadas entre dicho punto y el centro de la imagen. Como lo más habitual es identificar un punto del fuste situado por encima de 1,30 m, el diámetro a esa altura se subestimaría. Por el contrario, la sobrestimación de los valores del diámetro en el procesamiento de imágenes automático se atribuye a que la clasificación de los píxeles durante el proceso de segmentación tiende a clasificar píxeles pertenecientes a las ramas y hojas contiguos al fuste que presentan una composición espectral y varianza del color similar a los fustes, dando lugar a una sobreestimación de las dimensiones del fuste.

La Fig. 9 también muestra que la variable distancia es la que presenta una mejor relación lineal. Además, el grado de dependencia que presenta la variable distancia medida a partir de las imágenes obtenidas con el dispositivo de medición **ForeStereo I** (*distancia*) respecto a la distancia medida en campo (*distancia control*) (Fig. 9), se hace más evidente en el procesamiento semiautomático ($r^2 = 0,97$ en *Pinus sylvestris* y 0,99 en *Quercus pyrenaica* con el método semiautomático frente a 0,77 y 0,03 con el método automático).

Por otra parte, se puede observar en la Fig. 9 que la muestra analizada de distancias y diámetros presenta valores menores en *Quercus pyrenaica* que en el caso de *Pinus sylvestris*, debido a las menores dimensiones de los ejemplares de *Q. pyrenaica* en las masas en las que se instalaron las parcelas y que, al no considerarse aquellas secciones cuya sección es inferior a 4 píxeles, limitan la selección de los árboles a distancias mayores de 8 m.

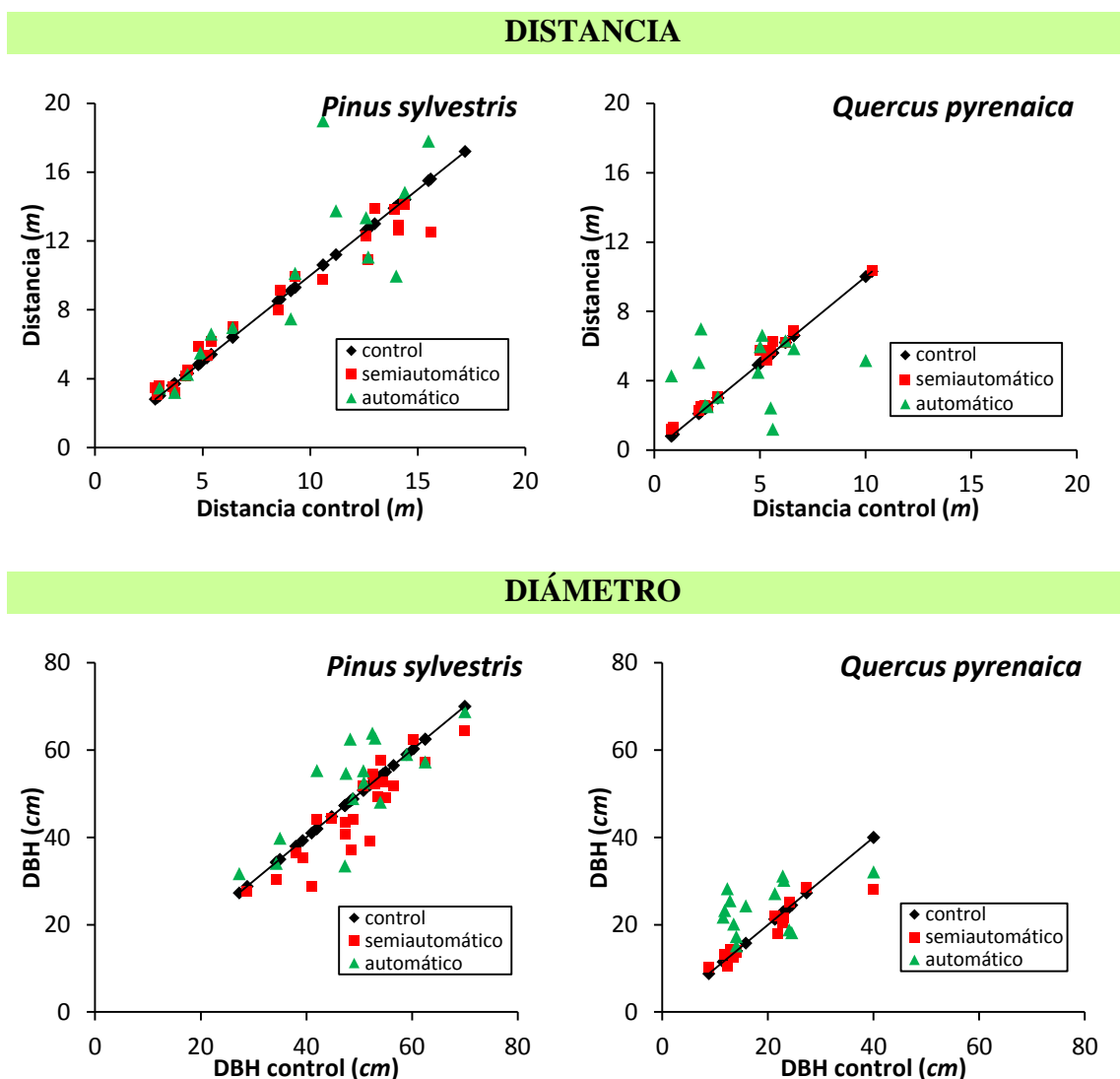


Fig. 9 Diferencia en la estimación de la distancia al árbol (arriba) y el diámetro normal DBH (abajo) aplicando el procesamiento de imágenes semiautomático y el automático para *Pinus sylvestris* y *Quercus pyrenaica* en relación a la medición control.

Los resultados mostrados en la tabla 4 indican una mejor predicción de las variables *distancia* y *DBH* en términos de error cuadrático medio para las dos especies con el procesamiento de imágenes semiautomático frente al automático. En el caso del *P. sylvestris*, se observa como a medida que el árbol se localiza más alejado del dispositivo de medición, aumenta el error de predicción de ambas variables (Fig. 10). Este hecho se debe a que los árboles situados a distancias elevadas se proyectan sobre las imágenes con unas dimensiones relativamente pequeñas en comparación al resto, haciendo que en la mayoría de los casos su procesamiento sea complicado debido a la resolución de las

imágenes. Asimismo, hay que tener en cuenta la limitación por parte del usuario en la comprobación visual de la identificación de árboles del procesado de imágenes semiautomático y automático con los datos de campo. Por estos motivos, se opta por desestimar aquellos árboles situados a distancias superiores a 15 m ya que las mediciones resultan poco fiables. Por otro lado, analizando por especies, se observa que el error relativo de la estimación del diámetro utilizando el método semiautomático es mejor en términos relativos en el caso del *P. sylvestris* que en el *Q. pyrenaica*. Este hecho podría deberse a que en el caso particular del *P. sylvestris* la forma del fuste se ajusta más a las restricciones geométricas del procedimiento de “region growing” que utiliza el procesado semiautomático (forma más cilíndrica) frente al *Q. pyrenaica*, que presenta un tronco más tortuoso. Esto deriva en un mejor poder discriminatorio en la clasificación de los píxeles pertenecientes a los fustes de los árboles en el proceso de segmentación con este método para *Pinus sylvestris* y por tanto, una mejor estimación del diámetro normal del árbol.

Tabla 4 Evaluación del error cuadrático medio para cada una de las variables dendrométricas implicadas en el estudio para el procesado de imágenes semiautomático y automático. En paréntesis aparece el número de árboles de cada especie (*Pinus sylvestris* y *Quercus pyrenaica*) identificados con los datos control tomados en campo en un radio de 15 m alrededor del centro de la parcela.

Variables	Semiautomático		Automático	
	<i>P. sylvestris</i>	<i>Q. pyrenaica</i>	<i>P. sylvestris</i>	<i>Q. pyrenaica</i>
Distancia (m)	0,82 (23)	0,68 (14)	1,06 (13)	0,75 (14)
DBH (cm)	2,23 (23)	1,64 (14)	3,12 (13)	2,25 (14)

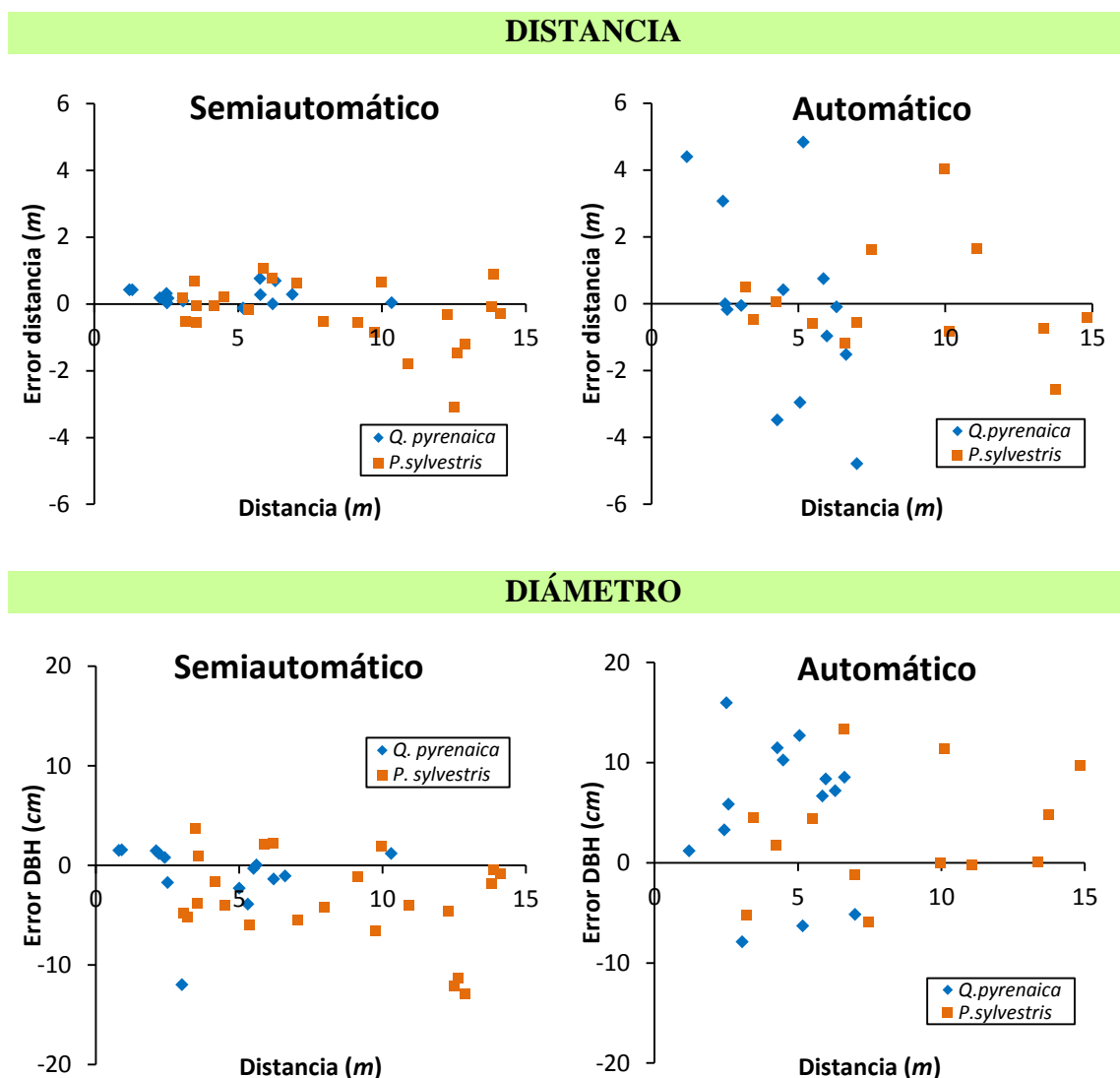


Fig. 10 Error medio del promedio de la estimación de la distancia (arriba) y el diámetro normal (DBH) (abajo) de cada árbol de *Quercus pyrenaica* y *Pinus sylvestris* en función de la distancia aplicando el procesamiento de imágenes semiautomático y automático.

Como consecuencia de los resultados presentados en este apartado, se opta por emplear el método de procesamiento de imágenes estereoscópicas semiautomático para estimar la estructura de la masa en sistemas forestales restaurados del Parque Nacional de Sierra Nevada a partir de la información derivada de los pares estereoscópicos de imágenes hemisféricas tomados mediante el dispositivo de medición MU2005-01738.

5.2 Estructura, composición y estado sucesional de la masa

La tabla 5 muestra una relación de la media y desviación estándar de las variables estudiadas en función de la intensidad de clara para el año 2011 y 2012. Para identificar el efecto de la zona y la intensidad de clara en la estructura, la composición y el estado sucesional de la masa se ha realizado un análisis de la varianza (tabla 6).

Tabla 5 Media y desviación estándar de las variables medidas según intensidad de clara en años consecutivos (2011 y 2012) en las parcelas de experimentación. Los índices de diferenciación de Clark & Evans y Gadow están calculados usando 3 vecinos por distancia y diámetro respectivamente. Fcc es la Fracción de Cobertura. N° sp y N° ind hace referencia al número de especies e individuos, respectivamente.

Variable			2011			2012		
			0	30	50	0	30	50
Índices de estructura	Patrón espacial	Índice Clark & Evans	-	-	-	1,211±0,378	1,606±0,664	1,136±0,091
	Diferenciación	Índice Gadow	-	-	-	0,246±0,037	0,249±0,024	0,280±0,029
	Variabilidad diamétrica	Índice SQRI	-	-	-	0,009±0,001	0,009±0,001	0,009±0,002
	Cobertura	Fcc	-	-	-	83,72±10,49	74,04±10,93	74,19±6,28
Composición de especies	Diversidad de especies	Índice Riqueza	17±2	10±3	11±4	18±2	14±5	13±5
		Índice Shannon	3,554±0,329	2,766±0,550	2,791±0,550	3,189±0,389	2,677±0,241	2,747±0,344
		Índice Simpson	0,888±0,034	0,797±0,080	0,790±0,075	0,840±0,060	0,782±0,029	0,798±0,041
	Tipo de semilla	N° sp semilla seca	12±1	8±3	8±4	13±2	11±3	8±4
		N° ind semilla seca	15±7	7±5	9±4	48±39	44±66	23±21
		N° sp semilla carnosa	5±2	2±1	4±1	5±2	4±2	4±2
		N° ind semilla carnosa	51±12	39±20	30±13	202±94	149±139	82±66
	Forma de vida	N° sp árbol	2±1	1±1	1±1	2±1	2±1	2±1
		N° ind árboles	14±3	14±4	14±4	22±3	22±8	22±6
		N° sp matorral	15±1	9±3	10±4	16±2	13±5	11±4
		N° ind matorrales	52±13	31±19	26±11	228±76	170±141	83±60
Regeneración	Origen pies encina	Densidad chirpiales	11±3	12±4	11±4	16±10	13±9	10±7
		Densidad brinzales	2±2	1±2	3±3	5±8	8±13	6±7
		Densidad total	13±4	14±4	14±4	20±3	21±9	16±5

Tabla 6 Valores de probabilidad de los análisis de varianza de cada variable analizada en los años 2011 y 2012 considerando como fuentes de variación la zona, la intensidad de la clara o tratamiento (tr) y su interacción. Los valores significativos aparecen en negrita (<0,05). Los índices de diferenciación de Clark & Evans y Gadow están calculados usando 3 vecinos por distancia y diámetro respectivamente. Fcc es la Fracción de Cobertura. N° sp y N° ind hace referencia al número de especies e individuos, respectivamente.

Variable			2011			2012		
			zona	tr	zona*tr	zona	tr	zona*tr
Índices de estructura	Patrón espacial	Índice Clark & Evans	-	-	-	0,0100	0,0650	0,0442
	Diferenciación	Índice Gadow	-	-	-	0,2247	0,1722	0,5507
	Variabilidad diamétrica	Índice SQRI	-	-	-	0,4268	0,6159	0,1845
	Cobertura	Fcc	-	-	-	0,8497	0,2553	0,7235
Composición de especies	Diversidad de especies	Índice Riqueza	0,5282	0,0132	0,1673	0,6376	0,0174	0,0047
		Índice Shannon	0,7538	0,0359	0,1660	0,5023	0,0441	0,1057
		Índice Simpson	0,9824	0,0740	0,2940	0,5525	0,1679	0,4642
	Tipo de semilla	N° sp semilla seca	0,9679	0,0883	0,1938	0,9647	0,0290	0,0281
		N° ind semilla seca	0,9116	0,0978	0,7479	0,0415	0,5015	0,6239
		N° sp semilla carnosa	0,0909	0,0016	0,0492	0,3666	0,3780	0,0247
		N° ind semilla carnosa	0,6283	0,0469	0,0524	0,8344	0,0931	0,0771
	Forma de vida	N° sp árbol	0,4350	0,1445	0,0449	0,3911	0,1657	0,2183
		N° ind árboles	0,4013	0,9618	0,8580	0,9748	0,9814	0,7132
		N° sp matorral	0,6400	0,0251	0,1541	0,8363	0,0692	0,0209
		N° ind matorrales	0,4799	0,0118	0,0750	0,2899	0,0093	0,0076
Regeneración	Origen pies encina	Densidad chirpiales	0,3334	0,4633	0,1508	0,0603	0,5594	0,3659
		Densidad brinzales	0,8012	0,3804	0,1919	0,0803	0,9929	0,5271
		Densidad total	0,2874	0,8511	0,7393	0,8085	0,4409	0,6169

5.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA DE LA MASA

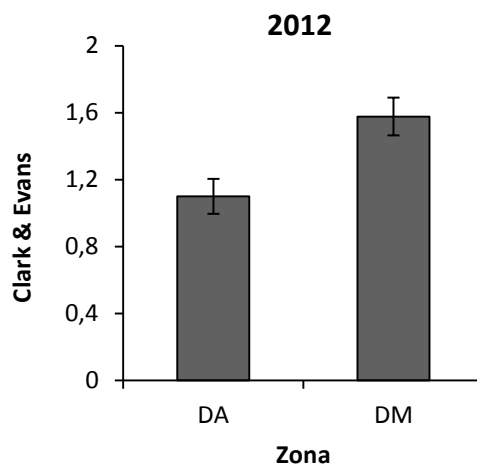


Fig. 11 Índice de Clark & Evans en las dos zonas de estudio (DA: Dílar Alto y DM: Dílar Medio). Las columnas representan valores medios y las barras los errores estándar.

Los resultados del análisis de varianza no mostraron diferencias significativas entre zonas, tratamientos o su interacción, para la estructura de la masa en relación a la diferenciación (índice de Gadow), variabilidad diamétrica (índice SQRI) ni cobertura (Fcc). Sin embargo, el patrón espacial (índice de Clark & Evans), sí mostró diferencias significativas entre las zonas estudiadas en el año 2012 (Fig.11).

Como se observa en la tabla 5, los valores del índice de Clark & Evans obtenidos muestran un patrón de distribución espacial aleatorio o de Poisson con cierta tendencia a la regularidad en el caso de las parcelas sometidas a una clara moderada. Por otro lado, los valores del índice de Gadow sugieren poca diferenciación horizontal de la masa, mostrando cierta regularidad donde los árboles vecinos son muy similares en tamaño al de referencia. El índice SQRI, se mantuvo constante para las distintas intensidades de clara debido a la alta homogeneidad diamétrica de la masa forestal y al corto periodo de tiempo transcurrido desde su aplicación. Por último, la Fracción de cabida cubierta, muestra una cobertura incompleta de la masa ($F_{cc} < 85\%$) (Tabla 5).

5.2.2 COMPOSICIÓN DE ESPECIES

En las parcelas de estudio, se identificaron un total de 35 especies leñosas distribuidas en 30 géneros y 17 familias en el año 2011, y 45 especies de leñosas distribuidas en 36 géneros y 18 familias en el año 2012. Los distintos regímenes de claras apenas varían la diversidad de especies en tan corto período de tiempo, sólo las parcelas sometidas a una clara moderada experimentaron un ligero aumento en el número de especies un año después del tratamiento (Fig. 12a y 12b).

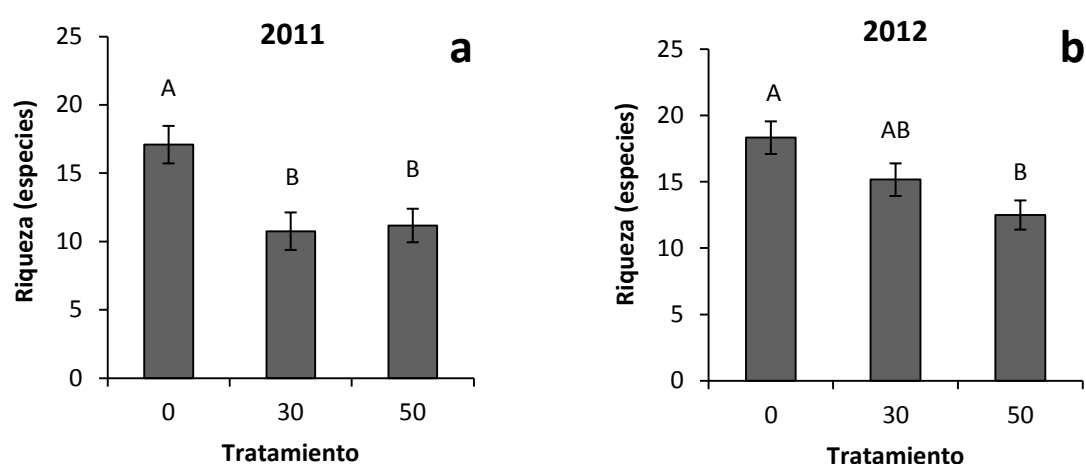


Fig. 12 Índice de Riqueza en número de especies según tratamiento (peso de clara de 0, 30 y 50%) promediado para las dos zonas (Dílar Alto, Dílar Medio) en el año 2011 (a) y 2012 (b). Las columnas representan valores medios y las barras los errores estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

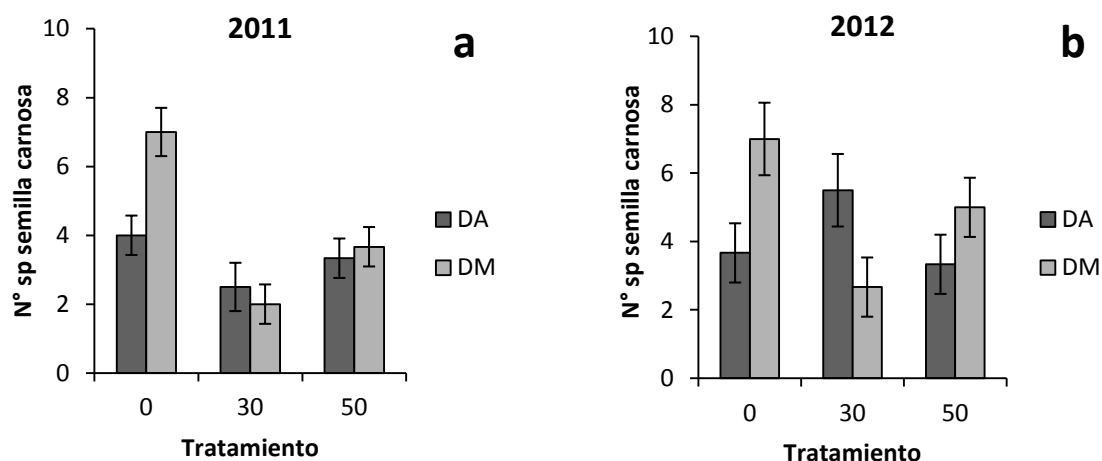


Fig. 13 Número de especies con semilla carnosa en las dos zonas de estudio (DA: Dílar Alto y DM: Dílar Medio) según tratamiento (peso de clara de 0, 30 y 50%) en el año 2011 (a) y 2012 (b). Las columnas representan valores medios y las barras los errores estándar.

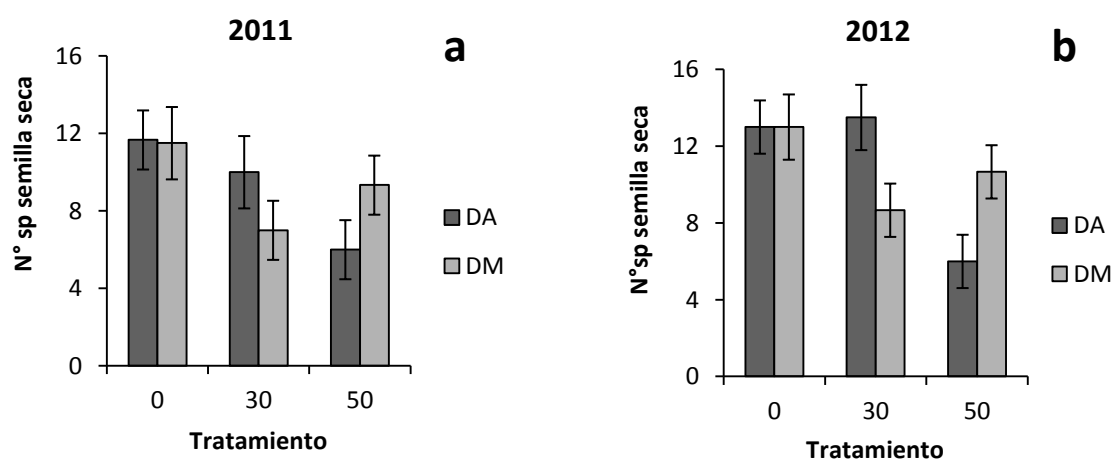


Fig. 14 Número de especies con semilla seca en las dos zonas de estudio (DA: Dílar Alto y DM: Dílar Medio) según tratamiento (peso de clara de 0, 30 y 50%) en los años 2011 (a) y 2012 (b). Las columnas representan valores medios y las barras los errores estándar.

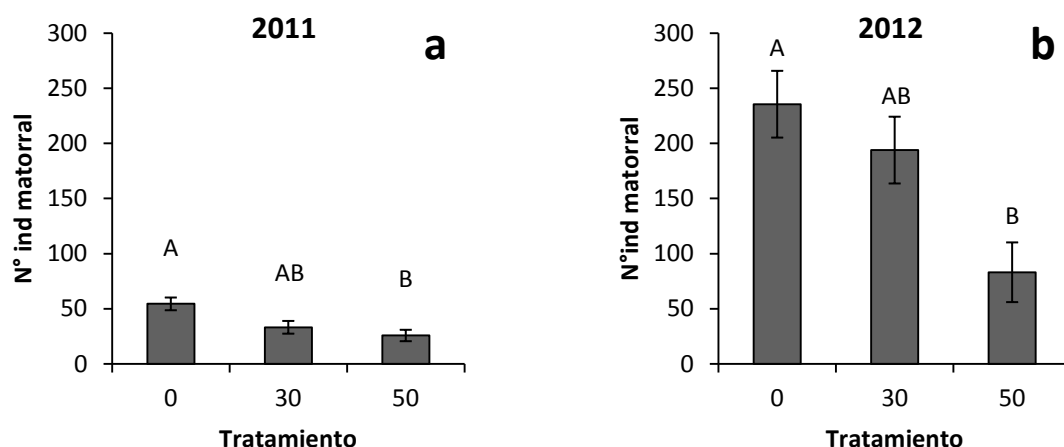


Fig. 15 Número de individuos de matorral según tratamiento (peso de clara de 0, 30 y 50%) promediado para las dos zonas (Dílar Alto, Dílar Medio) en el año 2011 (a) y 2012 (b). Las columnas representan valores medios y las barras los errores estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

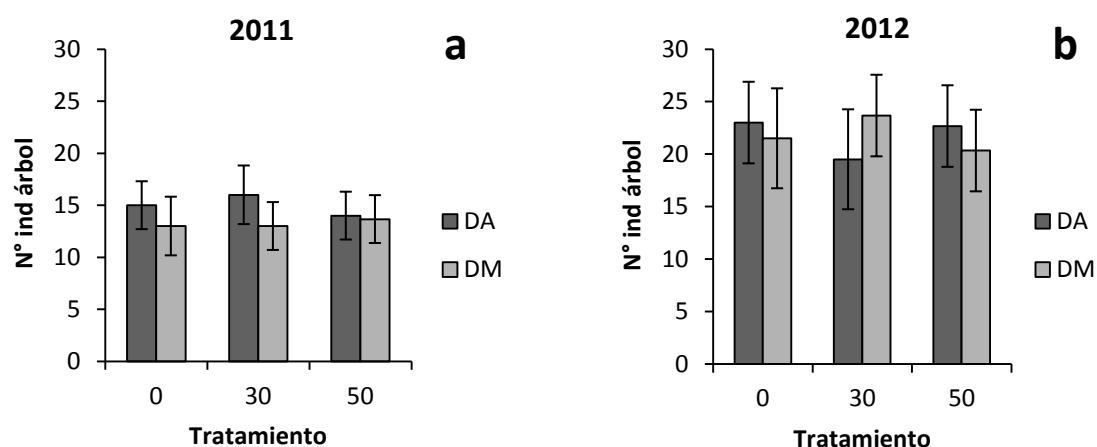


Fig. 16 Número de individuos de árbol en las dos zonas de estudio (DA: Dílar Alto y DM: Dílar Medio) según tratamiento (peso de clara de 0, 30 y 50%) en los años 2011 (a) y 2012 (b). Las columnas representan valores medios y las barras los errores estándar.

Hay que destacar que respecto al índice de Shannon y al de riqueza de especies los resultados mostraron efectos significativos del tratamiento para los dos años de estudio, mientras que el índice de Simpson no se vio significativamente afectado por ninguno de los factores analizados ni por su interacción. Por otro lado, los índices de diversidad de

especies con valores mayores coinciden con las parcelas testigo (Tabla 5), indicando una mayor riqueza de especies y mayor equidad en el número de individuos por especie en estas parcelas.

Asimismo, analizamos la composición de especies a través del tipo de semilla encontrando un efecto significativo del tratamiento en el número de individuos con semilla carnosa (Fig. 13a) para el año 2011 y con semilla seca para el año 2012 (Fig. 14b) con un ligero aumento del número de individuos para ambos tipos de semilla en las parcelas con clara moderada al final del periodo de estudio.

Finalmente, en cuanto a la forma de vida también se encontró un efecto significativo del tratamiento sobre el número de individuos de matorral para el año 2011 (Fig. 15a) y 2012 (Fig. 15b). Además, se registró un aumento considerable del número de individuos de matorral para el conjunto de las parcelas en el año 2012 en especial de aquellas con intensidad de clara moderada. No obstante, con respecto al número de individuos de especies arbóreas no se encontraron diferencias significativas, si bien se observó un aumento de los valores en el año 2012 generalizable para el conjunto del área de estudio (Fig. 16a y 16b).

En general, centrándonos en la composición de especies, se ha observado que en aquellas parcelas en las que se aplicaron claras de peso moderado hubo una mayor respuesta de la masa respecto al resto de intensidades de corta transcurrido un año desde el tratamiento. Esta respuesta se traduce en un incremento relativo mayor de los valores de diversidad de la masa respecto al año anterior.

5.2.3 REGENERACIÓN DE LA ENCINA

Los resultados del análisis de varianza no mostraron un efecto significativo de los factores analizados en la regeneración de encina en relación al origen de los pies (chirpial, brinzal), tampoco en la densidad total de regenerado (Tabla 5). Sin embargo, en el año 2012 se observa un incremento en el número de chirpiales en las parcelas testigo a altitudes mayores (Dílar Alto) (Fig. 17). El número de brinzales experimenta un incremento en 2012 en las parcelas situadas a menor altitud (Dílar Medio) (Fig.18).

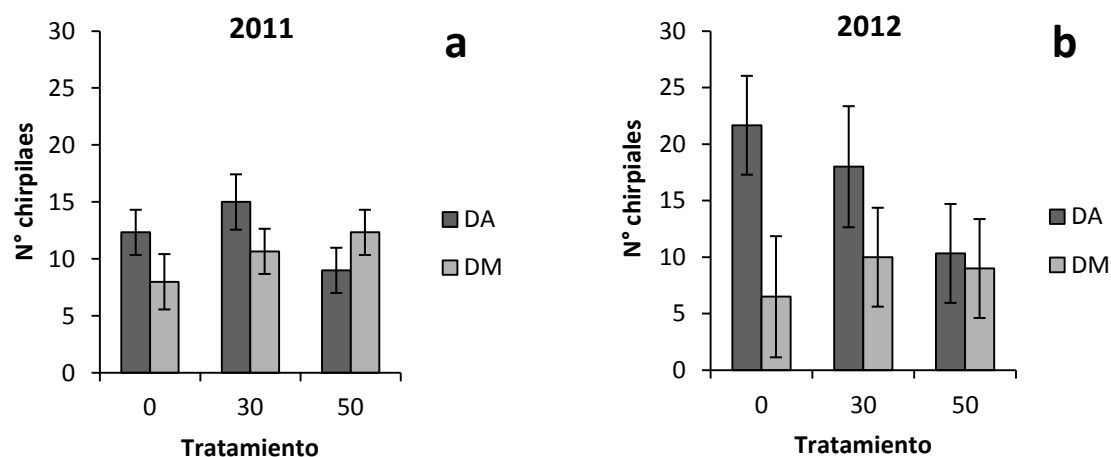


Fig. 17 Número de chirpiales de encina en las dos zonas de estudio (DA: Dílar Alto y DM: Dílar Medio) según tratamiento (peso de clara de 0, 30 y 50%) en los años 2011 (a) y 2012 (b). Las columnas representan valores medios y las barras los errores estándar.

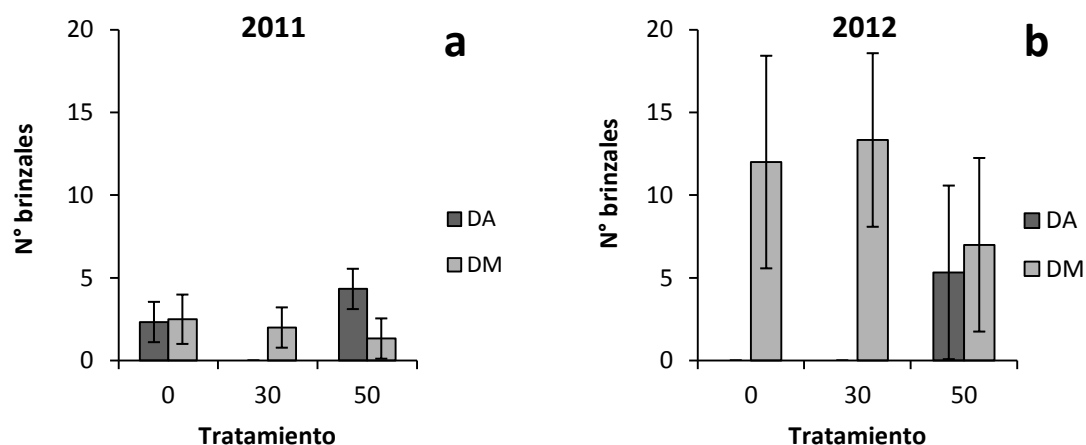


Fig. 18 Número de brinzales de encina en las dos zonas de estudio (DA: Dílar Alto y DM: Dílar Medio) según tratamiento (peso de clara de 0, 30 y 50%) en los años 2011 (a) y 2012 (b). Las columnas representan valores medios y las barras los errores estándar.

6. DISCUSIÓN

6.1 Análisis de imágenes estereoscópicas

Los resultados que se han obtenido del análisis de las parcelas descritas requieren su comprobación utilizando diferentes tipos de masas forestales y condiciones de iluminación. Sin embargo, el aprendizaje generado con la puesta en práctica de esta nueva metodología, la investigación y la evaluación de su validez ha generado resultados que han servido de base para orientar futuras líneas de investigación y plantear ajustes o cambios en los planteamientos llevados a cabo hasta el momento.

El procedimiento de desarrollo seguido en este caso ha permitido detectar ciertos problemas en el tratamiento de imágenes, entre ellos encontramos:

- Fenómenos de oclusión que se dan cuando un fuste se oculta detrás de otro en una de las imágenes del par estereoscópico. Este factor depende de la densidad de árboles presentes en la masa forestal.
- Variaciones en la iluminación de las imágenes de un mismo par estereoscópico que generan en un mismo fuste áreas muy iluminadas y otras muy oscuras, dificultando su correcta clasificación.
- Las hojas pueden tapar parte del fuste en unos casos, y en otros casos presentan unas características de intensidad y varianza del color muy similar a la de los fustes, en ambos casos dificultan la correcta identificación del fuste.
- Dificultades en la identificación de la parte inferior de los árboles que habitualmente se confunde con el suelo en las imágenes por presentar una intensidad y una varianza del color muy similar.
- La orientación radial de los troncos hacia el centro óptico en las imágenes que se establece como restricción en el proceso de identificación de los árboles no permite identificar adecuadamente árboles inclinados.

La metodología desarrollada para el tratamiento de las imágenes aún no permite diferenciar de manera automática las especies a las que pertenecen los árboles

analizados. Esto se debe fundamentalmente a la falta de homogeneidad en los patrones de textura de algunas de las imágenes que dificultan la identificación de las especies, aún tratándose de una misma especie. Una posible línea de investigación en el futuro puede ser el desarrollo de técnicas de entrenamiento basadas en redes neuronales o árboles de clasificación para, a partir de la clasificación de algunos árboles por parte del usuario, llevar a cabo la clasificación automática de los árboles identificados por especies.

Es posible mejorar los resultados en futuros estudios aumentando el número de fotografías por cada punto de muestreo. De esta manera, se consigue más información sobre todas las zonas de la imagen y aumenta la fiabilidad de los resultados obtenidos tras el posterior análisis y procesado de las imágenes. Para ello, se propone realizar una segunda toma fotográfica orientando el soporte de manera perpendicular a la primera captura del par de imágenes estereoscópicas. De este modo, los árboles situados en direcciones próximas a la línea base en el primer par, donde la precisión de las mediciones se reduce (Rodríguez, 2010), se proyectarían en direcciones más favorables para la medición.

6.2 Efectos de los tratamientos selvícolas en la estructura, composición y estado sucesional de la masa

La masa de pinar presenta un patrón de distribución regular independiente del régimen de claras aplicado, siendo las parcelas con tratamiento de claras moderado las que presentan una estructura más regular. La regularidad encontrada en las parcelas testigo se debe al origen de repoblación de la masa, sin embargo, esta regularidad no aumenta de forma progresiva con el peso de la clara, como ocurre cuando se realizan claras en masas procedentes de regeneración natural (Montes *et al.* 2004), si no que en las parcelas de intensidad de clara fuerte incluso se reduce, indicando que este tipo de claras aumenta la heterogeneidad en la distribución de los árboles en masas de repoblación. Por otro lado, las parcelas localizadas en Dílar Alto, sometidas a condiciones ecológicas más limitantes, presentan una estructura menos regular debido probablemente a una mayor mortalidad natural previa al tratamiento.

El índice de diferenciación horizontal presenta valores muy bajos en los distintos tratamientos. Esto significa que hay una gran homogeneidad entre árboles vecinos (microestructura) como consecuencia de la estructura de masa coetánea que aún persiste (escasa representación de clases diamétricas) y al corto período de tiempo transcurrido desde la intervención selvícola. También se observa una tendencia a aumentar la diferenciación con el tratamiento de clara fuerte (tabla 5), al eliminarse la uniformidad generada por la fuerte competencia intraespecífica. Este resultado contrasta con los estudios llevados a cabo por Montes *et al.* (2005) y Barbour *et al.* (1997) que sugieren que las claras pueden acelerar el desarrollo de algunos aspectos de la estructuras en masas regulares de origen natural, especialmente aquellos relacionados con la homogeneización. Algo similar ocurre con la variabilidad diamétrica a nivel de masa, caracterizada mediante el índice SQRI, que presenta valores muy bajos, resultando en una masa con alta homogeneidad diamétrica en toda el área de estudio. Kint (2005) observó en masas seminaturales un aumento de la complejidad y una evolución hacia un mayor número de clases diamétricas a lo largo del desarrollo de la masa. El seguimiento de la evolución de las parcelas utilizando la metodología desarrollada en este trabajo permitiría ver el efecto de la clara en esta diversificación estructural conforme aumenta el tiempo transcurrido.

Las parcelas estudiadas presentan una heterogeneidad entre parcelas bastante alta probablemente originada por perturbaciones de diferente tipo que van abriendo huecos en la masa. Esto explicaría porque la Fracción de cabida cubierta no disminuye con el aumento del peso de la clara, ya que depende fundamentalmente de la densidad inicial de pies de pinos que había en cada zona antes de la aplicación del régimen de cortas.

Cabe destacar una importante disminución de la diversidad de especies en las parcelas con régimen de clara moderada y fuerte en el año en el que se llevó a cabo el tratamiento respecto a las parcelas control. Esto podría deberse al efecto del pisoteo y al arrastre de los fustes durante la extracción de los árboles en la clara que provoca daños en la masa remanente o la compactación superficial, que dificulta el contacto de la semilla con la tierra mineral y sobre todo el adecuado enraizamiento (Serrada, 2004).

La alta densidad que presentan las masas estudiadas hasta la realización de la clara ha hecho que los árboles estén sometidos a un alto grado de competencia. La

composición de especies puede verse influenciada por la competencia intraespecífica por los recursos pero también, por la gestión forestal, resultando en una fuerte reducción de las especies dentro de la masa forestal (Neumann & Starlinger, 2001 y Maestre, 2002). En el caso de los tratamientos selvícolas, la composición puede verse afectada al reducir la competencia por los recursos. En este sentido, es importante considerar que la diversidad de la microestructura de la masa puede servir de indicador de los patrones de distribución espacial de las especies, perturbaciones naturales, ecología de las especies, etc. Además, algunos factores pueden interferir en la dinámica del sistema como por ejemplo, el estrés ambiental derivado de las condiciones abióticas, que puede resultar especialmente importante durante las primeras fases del desarrollo de los arbustos originando diferencias notables en los efectos negativos y positivos que intervienen en las interacciones árbol-arbusto (Maestre, 2002).

Un gran número de especies leñosas de frutos carnosos mediterráneos de sucesión tardía son especies tolerantes a la sombra, mientras que las especies leñosas pioneras (por ejemplo, *Cistaceae*, *Labiatae*, *Leguminosae*) por lo general tienen frutos secos (Herrera, 1995). Varios estudios han demostrado que existe un patrón de establecimiento de especies pioneras mediterráneas intolerantes a la sombra (especies de frutos secos) en claros abiertos por las perturbaciones y su reemplazo por especies tolerantes de sucesión tardía (especies de frutos carnosos) (Herrera, 1995 y Gómez-Aparicio *et al.* 2009). De este modo, las especies con fruto carnoso tienen mayor probabilidad de persistir en ambientes sombríos del sotobosque de plantaciones densas que las especies leñosas de frutos secos que requieren mayor demanda de luz (Gómez-Aparicio *et al.* 2009). Nuestro estudio parece confirmar esta hipótesis al observarse un mayor aumento de la proporción de individuos con fruto carnoso frente a individuos con fruto seco en las parcelas control. Sin embargo, el número de especies con fruto carnoso es menor que el de especies de fruto seco en todos los tratamientos, que podría ser consecuencia de la limitación en la dispersión de las semillas por los pájaros (principal agente dispersor de la semillas que se ve afectado negativamente por las altas espesuras, especialmente en el caso del arrendajo (De la Montaña *et al.* 2006)) y la lejanía a las fuentes de semillas). También se ha observado un aumento considerable en el número de individuos con fruto seco en el segundo año, generalizable a toda el área de estudio, que podría explicarse por la disminución de la alta espesura de la masa que facilita la

dispersión de las semillas por el viento y por una mayor exposición a la radiación solar que favorece la germinación de estas especies más pioneras.

El estado sucesional se encuentra estrechamente relacionada con la diversidad estructural (Barbeito *et al.* 2009). A través del estudio de la Fracción de cabida cubierta, podemos establecer relaciones con la presencia del regenerado de las especies, con especial hincapié en la regeneración de la encina. Así, la disponibilidad de luz que viene determinada por el tipo de cobertura arbórea juega un papel fundamental en la regeneración de plantas en muchos ecosistemas terrestres, influyendo en el reclutamiento y el desarrollo de muchas especies de plantas (Valladares, 2003 y Gómez *et al.* 2004). En este sentido, las claras ejecutadas aumentan la iluminación que reciben las especies bajo el sotobosque de pinar y en el caso de *Quercus ilex* subsp. *ballota*, esto se traduce en una intensa brotación de tallos de cepa (chirpiales), como ya se ha observado para otras especies de *Quercus* mediterráneos (Montes *et al.* 2005). Sin embargo, el número de brinzales de *Q.ilex* aumenta durante el segundo año únicamente en las parcelas situadas a menor altitud, lo que podría estar relacionado con las condiciones más limitantes existentes en las parcelas de la zona alta (Gómez *et al.* 2004, Serrada, 2004).

La variabilidad de la respuesta de los brinzales de *Q. ilex* a los distintos regímenes de claras podría estar relacionada con la dispersión de bellotas, cuya principal fuente de dispersión son los arrendajos y los roedores (Gómez, 2003; Gómez *et al.* 2004 y Gómez-Aparicio *et al.* 2009). En estos ambientes mediterráneos, los arrendajos transportan las bellotas sobre todo a microhábitats sombreados, disminuyendo la probabilidad de que una bellota germine en un microhábitat que recibe fuerte radiación solar, como ocurre en las parcelas sometidas a un peso de clara fuerte. De igual manera ocurre con los roedores que eligen microhábitats sombreados para ocultar las bellotas (Gómez, 2003). Por esta razón es probable que *Q.ilex* no experimente un patrón de aparición específico en relación al tratamiento o la zona, y que la heterogeneidad espacial de los brinzales venga determinado por los movimientos de los dispersores de semillas que no se mueven aleatoriamente en el paisaje (Gómez *et al.* 2004). También, podría deberse al aumento en la disponibilidad de luz bajo el sotobosque, tras la ejecución de las claras, que favorece la activación del banco de semillas de *Q.ilex*, especialmente en aquellas zonas donde las condiciones ecológicas son menos limitantes.

Implicaciones para la gestión de estas repoblaciones

Aunque el paisaje del Parque ha estado sujeto a la influencia humana, los ecosistemas son dinámicos y cambiantes y se requiere un enfoque de manejo activo y adaptativo. Se asume que la restauración debe abordarse a través de la protección del área y la supresión de los factores de degradación como incendios y plagas y dejando operar a los procesos de regeneración natural (Jardel, 2008). Sin embargo, la intervención selvícola a través de las claras puede redirigir las plantaciones hacia densidades más naturales con regeneración activa donde predomine la facilitación, fomentándose la resiliencia frente a las perturbaciones, con altos niveles de diversidad (Maestre & Cortina, 2004 y Gómez-Aparicio *et al.* 2009). En este sentido, es preciso mantener un cierto nivel de intervención en las repoblaciones de alta densidad con la sucesión comprometida y baja diversidad (Gómez-Aparicio *et al.* 2009), pero existen numerosas incertidumbres sobre qué tipo de intervención y con qué frecuencia e intensidad debe realizarse. Y el debate es particularmente relevante cuando se trata de la gestión de un espacio natural protegido (Valladares, 2004). Es interesante destacar que los resultados obtenidos en el presente trabajo tienen implicaciones para la gestión de las repoblaciones de pinares en el área mediterránea, especialmente en áreas protegidas. Tal y como se ha comentado en la introducción, uno de los principales argumentos utilizados para su empleo en las actividades de restauración es que las repoblaciones de coníferas facilitan la llegada de otras especies pertenecientes a etapas avanzadas de la sucesión vegetal. Para que esto se produzca es necesaria la intervención selvícola que modifique la dinámica actual del sistema forestal. En las parcelas estudiadas el efecto de las claras inmediatamente después del tratamiento parece indicar un empobrecimiento de la vegetación del sotobosque, probablemente producido por los daños causados al aprear y arrastrar los pies extraídos. Sin embargo, los cambios en la cobertura vegetal registrados durante el año de estudio muestran cierta respuesta a los tratamientos de clara llevados a cabo, e indican que es el tratamiento más moderado el que presenta un mayor incremento tanto en la diversidad de especies como en la regeneración de *Q. ilex*. Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con el trabajo de Serrada *et al.* (2011), que propone aplicar un plan de claras de rotación corta y peso moderado-débil en masas de pinares de origen artificial con función de protección hidrológica. Asimismo, estos autores recomiendan aplicar cortas de regeneración de entresaca por

bosquetes que deriven en masas irregulares y posibiliten la incorporación de nuevas especies dando lugar a masas mixtas, que aumenten la diversidad estructural frente a masas monoespecíficas (Barbeito *et al.* 2009). Por su parte, Gómez-Aparicio *et al.* 2009, sugieren valores óptimos de densidad de 500-1000 *pies/ha* (en torno a 500 *pies/ha* en condiciones de mayor estrés climático) que permitan la regeneración de especies arbóreas así como altos niveles de diversidad de especies herbáceas y leñosas. También señala la improbabilidad de establecimiento de las especies nativas por encima de los 1000 *pies/ha* por la difícil adaptación de las especies a tales niveles de competición.

Las estrategias de gestión también deben tener en cuenta que la colonización espontánea de una plantación depende en gran medida de su distancia a los fragmentos de bosque natural que actúan como fuentes de semillas, así como en la capacidad de dispersión de las especies que habitan en estos bosques (Gómez-Aparicio *et al.* 2009). Así, entre el conjunto de especies nativas de árboles presentes en la zona de estudio, *Quercus ilex* subsp. *ballota* fue la única especie caducifolia abundantemente presente en el sotobosque del pinar. Otras especies como *Quercus pyrenaica* Willd., *Acer opalus* subsp. *granatense* (Boiss.) Font Quer & Rothm. o *Sorbus aria* (L.) Crantz están ausentes, probablemente, debido a la limitación de semillas derivada de la baja abundancia regional (la mayoría de las plantaciones se encuentran muy lejos de la fuente de semillas de estas especies) y/o se trata de sistemas de dispersión menos efectivos (e.g., dispersión por viento en *Acer*) (Gómez-Aparicio *et al.* 2005 y Gómez-Aparicio *et al.* 2009). En base a esta problemática se plantea la posibilidad de llevar a cabo la plantación de estas especies para incrementar la diversidad y la abundancia del banco de semillas y así ayudar a recuperar la estructura de masa mixta original de estos bosques, donde *Pinus*, *Quercus*, *Acer*, y *Sorbus* coexisten. El reto de aumentar la diversidad de especies en el área, consistirá en definir una proporción adecuada de tipos de vegetación y rodales en distintas etapas de la sucesión en el mosaico del paisaje, lo cual implica entender mejor los patrones de diversidad y la distribución de las especies a esa escala (Jardel, 2008).

Se ha de tener en cuenta que las mediciones de este estudio se han realizado en un corto periodo de tiempo. Por este motivo resulta sumamente importante la comprobación futura, mediante el seguimiento y monitoreo de la masa, de la recuperación del bosque y la tendencia al establecimiento y crecimiento de frondosas,

así como otras especies leñosas que intervienen en la dinámica sucesional de estas repoblaciones.

6.3 Líneas de investigación futuras

En el futuro sería interesante ampliar los conocimientos sobre el efecto de los tratamientos selvícolas en aspectos relacionados con la estructura y función de las repoblaciones del Parque nacional de Sierra Nevada utilizando para ello, las técnicas desarrolladas en este proyecto y en algunos casos avanzando en nuevos métodos de análisis de imágenes estereoscópicas hemisféricas. Algunos de estos aspectos a tratar serían:

- Estudios de radiación y estimación del Índice de Área Foliar (LAI).
- Estudios de diversidad de especies y su distribución espacial tanto de especies arbóreas como arbustivas.
- Estudios de regeneración y competencia o interacciones entre especies a partir del patrón espacial o distribución en el espacio de los individuos.

Por otro parte, cabe destacar que el registro de fotografías de varios años puede contribuir a:

- Estudios de crecimiento y evolución de la masa y su regenerado.
- Estudios del papel que desempeñan estos bosques como sumideros de carbono.
- Seguimiento de la respuesta a los tratamientos selvícolas.
- Monitoreo de daños por plagas o episodios climáticos extremos.

Otro de los beneficios futuros que plantea el uso de este dispositivo de medición y la metodología aquí desarrollada es poder llevar a cabo la caracterización de la masa a partir de la distribución diamétrica y de la dinámica de especies, identificando los procesos que intervienen en el desarrollo de la masa y en la sucesión ecológica, de una forma menos costosa que mediante las técnicas de inventario tradicionales y que permitan ser medidos de una manera sistemática y periódica.

7. CONCLUSIONES

- 1) El procesamiento semiautomático de fotografías estereoscópicas hemisféricas tomadas con el sistema de medición MU2005-01738 permite estimar las variables distancia y diámetro normal del árbol con mayor precisión en un número mayor de árboles que el método de la clasificación automática de todos los píxeles de las imágenes.
- 2) La gestión forestal necesita instrumentos de medición que sean capaces de evaluar lo más objetiva y económicamente posible las características estructurales de las masas forestales. El sistema de medición MU2005-01738 y el software de análisis de imágenes *ForeStereo* han demostrado ser unas herramientas muy útiles para el seguimiento de la diversidad estructural de las repoblaciones de pinares del Parque Nacional de Sierra Nevada.
- 3) El análisis de la estructura de la masa mediante índices del vecino más cercano, que son fácilmente calculables a partir de la información obtenida mediante el software *ForeStereo*, indica que los tratamientos con claras juegan un papel clave en la dinámica de la diversidad estructural, aumentando la heterogeneidad espacial en las masas de repoblación. Sin embargo, el corto intervalo de tiempo transcurrido desde que se llevaron a cabo los tratamientos podría ser la causa de que no se observen diferencias en la diferenciación y variabilidad diamétrica.
- 4) De los tres tratamientos de clara aplicados, la clara de peso moderado fue la que propició la instalación de un mayor número de especies leñosas y una respuesta mayor en la regeneración de *Q. ilex*. Los tratamientos mediante claras de peso moderado y corta rotación serían, por lo tanto, los más indicados para restablecer la dinámica sucesional y la diversidad en las masas de repoblación estudiadas.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ASPIZUA, R., BOLLULLOS, C & LÓPEZ, M.R., 2012. Evaluación de la gestión forestal en pinares de repoblación. Pp.:52-53. En: Aspizua, R., Barea-Azcón, J.M., Bonet, F.J., Pérez-Luque, A.J. y Zamora, R.J. (coords.). *Observatorio de Cambio Global Sierra Nevada: metodologías de seguimiento*. Conserjería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- BARBEITO, I., CAÑELLAS, I & MONTES, F., 2009. Evaluating the behaviour of vertical structure indices in Scots pine forests. *Ann. For. Sci.* 66, (7), p 710. doi: [10.1051/forest/20099056](https://doi.org/10.1051/forest/20099056)
- BARBÉRO, M., LOISEL, R., QUÉZEL, P. D., RICHARDSON, M. & ROMANE, F., 1998. *Pines of the Mediterranean Basin*. In: D. M. Richardson, editor. Ecology and biogeography of Pinus. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 153-170 p.
- BARBOUR, R.J., JOHNSTON, S., HAYES, J.P., TUCKER, G.F., 1997. Simulated stand characteristics and wood product yields from Douglas-fir plantations managed for ecosystem objectives. *Forest Ecol. Manag.* 91, 205-219. doi: [10.1016/S0378-1127\(96\)03873-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03873-X)
- BONET, F.J., PÉREZ-LUQUE, A.J., MORENO, R. & ZAMORA, R., 2010. *Observatorio Global en Sierra Nevada. Estructura y Contenidos Básicos*. Conserjería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía – Universidad de Granada, 48 p.
- CAMACHO, M.T., GARCÍA, P., JIMÉNEZ, Y., MENOR, J. & PANIZA, A., 2002. Dinámica evolutiva del paisaje vegetal de Alta Alpujarra Granadina en la segunda mitad del Siglo XX. *Cuadernos Geográficos*, 32, 25-42.
- CASTILLO, A., 2000. *Parque Nacional de Sierra Nevada. Clima e Hidrología*. Parque Nacional de Sierra Nevada, Canseco editores. ISBN: 9788493209513, 300 p.
- CLARK, P.J & EVANS, F.C., 1954. Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationship in populations. *Ecology* 35, 445-453. doi: [10.2307/1931034](https://doi.org/10.2307/1931034)
- DEGRAAF, R.M., HESTBECK, J.B. & YAMASAKI, M., 1998. Associations between breeding bird abundance and stand structure in the White Mountains, New Hampshire and Maine. U.S.A. *Forest Ecol. Manag.* 103, 217-233. doi: [10.1016/S0378-1127\(97\)00213-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00213-2)

- DE LA MONTAÑA, E., REY-BENAYAS, J.M. & CARRASCAL, L.M., 2006. Response of bird communities to silvicultural thinning in Mediterranean maquis. *Journal of Applied Ecology* 43, 651-659. doi: [10.1111/j.1365-2664.2006.01171.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01171.x)
- DEL RÍO, M., MONTES, F., CAÑELLAS, I. & MONTERO, G., 2003. Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For* 12 (1), 159-176.
- ELLIS, E.C. & RAMANKUTTY, N., 2008. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6: 439-447. doi: [10.1890/070062](https://doi.org/10.1890/070062)
- FOSTER, D.R., 2000. Conservation lessons and challenges for ecological history. *Forest History Today*. Fall: 2-11.
- GAVILÁN, R.G. & RUBIO, A., 2005. ¿Pueden los índices de diversidad biológica ser aplicados como parámetros técnicos de la gestión forestal? Actas de la I Reunión sobre Ecología, Ecofisiología y Suelos Forestales. *Cuad. Soc, Esp. Cienc. For.* 20: 93-98.
- GARCÍA, D., VIZCAÍNO, P., ALONSO, C., BAEZA, D., CORTÁZAR, J. & MARCHAMALO, M., 2006. *Estimación del régimen de caudales ambientales del sistema cornisa-vega de Granada*. Estudio metodológico para la integración de recursos hídricos subterráneos, superficiales y alternativos en las comarcas de la vega de Granada y Cornisa de Granada. Anejo 5.º proyecto: CAU03/06. Ecohidráulica S.L.
- GÓMEZ, A., PALACIOS, D., PALADE, B., VÁZQUEZ, L., SALVADOR, F., TANARRO, L.M. & OLIVA, M., 2013. La evolución glaciaria de Sierra Nevada y la formación de glaciares rocosos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. Nº 61, pp. 139-162. ISSN.:0212-9426.
- GÓMEZ, J.M., VALLADARES, F. & PUERTA-PIÑERO, C., 2004. Differences between structural and functional environmental heterogeneity caused by seed dispersal. *Functional Ecology*, 18, 787-792. doi: [10.1111/j.0269-8463.2004.00912.x](https://doi.org/10.1111/j.0269-8463.2004.00912.x)
- GÓMEZ, J.M., 2003. Spatial pattern in long-distance dispersal of *Quercus ilex* acorns by jays in a heterogeneous landscape. *Ecography*. 26, 573-584. doi: [10.1034/j.1600-0587.2003.03586.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0587.2003.03586.x)
- GÓMEZ-APARICIO, L., ZAVALA, M.A., BONET, F.J. & ZAMORA, R., 2009. Are pine plantations valid tools for restoring Mediterranean forests? An assessment along abiotic and biotic gradients. *Ecological Applications*, 19 (8), 2124-2141. doi: [10.1890/08-1656.1](https://doi.org/10.1890/08-1656.1)

- GÓMEZ-APARICIO, L., GÓMEZ, J.M. & ZAMORA, R., 2005. Microhabitats shift Rank in suitability for seedling establishment depending on habitat type and climate. *Journal of Ecology* 93, 1194-1202. doi: [10.1111/j.1365-2745.2005.01047.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2005.01047.x)
- HERRERA, P.J., PAJARES, G., GUIJARRO, M.A., RUZ, J., CRUZ, J.M. & MONTES, F., 2009. A featured-based strategy for stereovision matching in sensors with fish-eye lenses for forest environments. *Sensors*, Vol. 9, pp. 9468-9492, ISSN 1424-8220; doi: [10.3390/s91209468](https://doi.org/10.3390/s91209468)
- HERRERA, J., 2010. *Correspondencia estereoscópica en imágenes obtenidas con proyección omnidireccional para entornos forestales*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 246 p.
- HERRERA, C. M., 1995. Plant-vertebrate seed dispersal systems in the Mediterranean: ecological, evolutionary, and historical determinants. *Annual Review of Ecology and systematics* 26, 705-727. doi: [10.1146/annurev.ecolsys.26.1.705](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.26.1.705)
- HERRERO, C., LIZARRALDE, I. & BRAVO, F., 2005. Ecuaciones de perfil de fuste para *Pinus sylvestris* y *Quercus pyrenaica* en los páramos ácidos de Castilla y León. Actas del IV Congreso Forestal Español. Tomo 4CFE04-333-T1, p 303.
- JARDEL, E.J., 2008. Sucesión ecológica y restauración de bosques subtropicales de montaña en la Estación Científica Las Joyas, México. Páginas 77-97 en González-Espinosa, M., Rey-Benayas, J.M y Ramírez-Marcial, N., eds. Restauración de bosques en América Latina. *Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas (FIRE) y Editorial Mundi-Prensa México*, México.
- KINT, F., 2005. Structural development in ageing temperate Scots pine stands. *For. Ecol. Manage.* 214, 237-250. doi: [10.1016/j.foreco.2005.04.014](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.04.014)
- MAESTRE, F.T. & CORTINA, J., 2004. Are *Pinus halepensis* plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas? *Forest Ecology and Management* 198, 303-317. doi: [10.1016/j.foreco.2004.05.040](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.040)
- MAESTRE, F.T., 2002. *La restauración de la cubierta vegetal en zonas semiáridas en función del patrón espacial de factores bióticos y abióticos*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante, Alicante, 385 p.

- MCELHINNY, C., GIBBONS, P., BRACK, C. & BAUHUS, J., 2005. Forest and Woodland stand structural complexity: Its definition and measurement. *Forest Ecol. Manag.* 218 (2055) 1-24. doi: [10.1016/j.foreco.2005.08.034](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.034)
- MONTES, F. & COLABORADORES., 2010. *Desarrollo de métodos de seguimiento de la diversidad estructural de los bosques utilizando imágenes hemisféricas: una nueva herramienta de monitoreo para la gestión forestal* (161/2010 Proyectos de Investigación en Parques Nacionales 2010). Memoria Técnica. Documento inédito.
- MONTES, F., SÁNCHEZ, M., DEL RÍO, M. & CAÑELLAS, I., 2005. Using historic management records to characterize the effects of management on the structural diversity of forest. *Forest Ecology and Management* 207, 279-293. doi: [10.1016/j.foreco.2004.10.031](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.031)
- MONTES, F., CAÑELLAS, I., DEL RÍO, M., CALAMA, R. & MONTERO, G., 2004. The effects of thinning on the structural diversity of coppice forests. *Ann. For. Sci.* 61: 771-779. doi: [10.1051/forest:2004074](https://doi.org/10.1051/forest:2004074)
- MURDOCH, W.W., EVANS, F.C. & PETERSON, C.H., 1972. Diversity and pattern in plants and insects. *Ecology* 53 (5), 819-829. doi: [10.2307/1934297](https://doi.org/10.2307/1934297)
- NEUMANN, M. & STARLINGER, F., 2001. The significance of difference indices for stand structure and diversity in forests. *Forest Ecology and Management* 145, 91-106. doi: [10.1016/S0378-1127\(00\)00577-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00577-6).
- OTSU, N., 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9, (1), 62-66; doi: [10.1109/TSMC.1979.4310076](https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076)
- PAUSAS, J.G., BLADÉ, C., VALDECANTOS, A., SEVA, J.P., FUENTES, D., ALLOZA, J.A., VILAGROSA, A., BAUTISTA, S., CORTINA, J. & VALLEJO, R., 2004. Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes of Spain: new perspectives for an old practice: a review. *Plant Ecology* 171: 209-220. doi: [10.1023/b:vege.0000029381.63336.20](https://doi.org/10.1023/b:vege.0000029381.63336.20)
- PEET, R.K., 1974. The measurement of species diversity. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 5: 285-307. doi: [10.1146/annurev.es.05.110174.001441](https://doi.org/10.1146/annurev.es.05.110174.001441)
- PEZZI, M. & GARCÍA-ROSELL, L., 1978. Análisis del medio físico de Sierra Nevada: Ordenación de sus recursos y clasificación de unidades paisajísticas. *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*. ISSN 0210-5462, 8, 211-230 p.

- PÉREZ-RAYA, F., LÓPEZ-NIETO, J.M., EL AALLALI, A. & HITA-FERNÁNDEZ, J.A., 2001. *Cartografía y evaluación de la vegetación del Parque Natural de Sierra Nevada*. Conserjería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, España.
- PULIDO, M., PULIDO, F. MARTÍNEZ, F., 1982. Consideraciones climatológicas sobre el borde occidental de Sierra Nevada (Granada). *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, ISSN 0210-5462, nº12, pp. 5-26.
- RODRÍGUEZ, C., 2010. *Desarrollo de una metodología de medición y cubicación en parcelas de Eucalyptus globulus (Labill.) utilizando pares estereoscópicos de imágenes hemisféricas*. Universidad Politécnica de Madrid. Trabajo Fin de Carrera. Documento no publicado, 87 p.
- SERRADA, R., AROCA, M.J., ROIG, S., BRAVO, A. & GÓMEZ, V., 2011. *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector forestal. Notas sobre gestión adaptativa de las masas forestales ante el cambio climático*. Ed. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 126 p. ISBN: 972-84-491-1131-0.
- SERRADA, R., 2004. *Apuntes de Selvicultura*. Servicio de Reprografía de la E.U.I.T. Forestal, Universidad Politécnica de Madrid, 490 p.
- TORRES, M.A., 1998. *Reconstrucción confiable de superficies usando rango de disparidad adaptativo*. Trabajo Fin de Máster. Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Ingeniería, Santiago de Chile, 203 p.
- VALLADARES, F., 2004. Cambio global y ambiente lumínico en ecosistemas forestales mediterráneos: consideraciones ecológicas e implicaciones para la gestión. Actas de la I Reunión sobre Ecología, Ecofisiología y Suelos Forestales. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 20: 37-46.
- VALLADARES, F., 2003. Light heterogeneity and plants: from ecophysiology to species coexistence and biodiversity. Progress in Botany (eds Kesser, U. Lüttge, W. Beyschlag & F. Hellwig), p. 439-471. Springer Verlag, Heidelberg, Germany.
- WEBER, J., 2000. Geostatistische Analyse der Struktur von Waldbeständen am Beispiel ausgewählter Bannwälder in Baden-Württemberg. Berichte Feiburger Forstliche Forschung Heft 20. FVA Baden-Wurtemberg. Freiburg. 133.
- WHITTAKER, R.H., 1977. *Evolution of species diversity in land communities*. En: Evolutionary biology, vol. 10. Hecht M.K., Steere W.C., Wallace b. (Ed.), Plenum, p. 1-67.

ZAVALA, M.A., ESPELTA, J.M. & RETANA, J., 2000. Constraints and trade-offs in Mediterranean plan communities: the case of holm oak-aleppo pine forests. *The Botanical Review* 66, 119-149.

Páginas web consultadas:

<http://www.un.org/es/events/biodiversityday/convention.shtml> - Página web de Naciones Unidas.
(consulta realizada en abril 2013).

<http://wiki.obsnev.es/> - Página web del Observatorio del cambio global de Sierra Nevada.
(consulta realizada en abril 2013).

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

ANEXO I

Características técnicas del Forestereo I y II

Nuria Simón Cid

A series of overlapping, semi-transparent green polygons of various shades (light green, medium green, and dark green) arranged in a jagged, mountain-like pattern across the bottom third of the page.

Septiembre 2.013

ANEXO I: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL FORESTEREO I Y II

En la siguiente tabla se recogen las principales características de los sistemas de medición *ForeStereo I* y *ForeStereo II*. La resolución espacial viene determinada por el nº de elementos sensores, es decir, el nº de píxeles respecto de las dimensiones ancho (H) y alto (V).

CARACTERÍSTICAS	FORESTEREO I	FORESTEREO II
Cámara	Nikon® Coolpix® 4500	Hitachi Kokusai® KP-F500GV
Nº cámaras	1 móvil → raíl	2 fijas → soporte
Lente “ojo de pez”	Nikon® FC-E8	Fujinon® FE185CO57HA-1
Apertura lente	183°	185°
Altura lente	Fija= 1,25m	Nivelada≈ 1,30m
Resolución	2272(H)x1704(V)= 4Megapíxeles	2536(H)x2068(V)= 5Megapíxeles
Separación ejes ópticos	1,007m	0,8m
Modo de la exposición	Control manual	Control automático
Tiempo toma fotográfica	Imágenes desfasadas	Imágenes sincronizadas
Grabación de imágenes	Memoria cámara	Software (Ordenador de campo)

ANEXO II

Ejemplo de procesamiento imágenes de ForeStereo

Nuria Simón Cid

Septiembre 2.013

The bottom half of the page features a series of overlapping, semi-transparent green polygons. These shapes are arranged to create a sense of depth and movement, resembling a stylized landscape or a series of steps. The colors range from a light, pale green to a more vibrant, medium green. The overall effect is modern and minimalist.

ANEXO II: EJEMPLO DE PROCESADO DE IMÁGENES DE FORESTEREO

En este anexo se muestra un ejemplo de procesamiento de imágenes estereoscópicas hemisféricas tomadas con el sistema de medición con número de patente MU2005-01738. Para procesar las imágenes se han empleado dos métodos de segmentación y correspondencia, uno semiautomático que precisa de la identificación por parte del usuario de aquellos árboles que constituyen un par homólogo, y un segundo método en el que la clasificación de los píxeles y la correspondencia se lleva a cabo de forma completamente automática. Ambos métodos han sido desarrollados en el marco del proyecto 161/2010 e implementados en una aplicación automática con interfaz gráfica de usuario programada en Matlab® y denominada *ForeStereo*, que incorpora métodos para estimar las diferentes variables dendrométricas y dasométricas de la masa forestal a partir de los datos obtenidos en el proceso de segmentación y correspondencia siguiendo la metodología recogida en este trabajo (véase apartado 4.1). Como datos de partida se han utilizado un par de imágenes estereoscópicas hemisféricas obtenidas mediante el 1º prototipo de este dispositivo de medición, *Forestero I*, en una parcela cuyo levantamiento se llevó a cabo en el año 2006 y que corresponde a una masa de *Quercus pyrenaica* Lam. en el Sistema Central.

Recuadro II.1 DATOS Y PARÁMETROS DE ENTRADA Y SELECCIÓN DE LÍNEA DE PENDIENTE

El software muestra una ventana de trabajo donde se cargan el par de imágenes estereoscópicas y se introducen los datos de entrada (especificaciones del dispositivo y del muestreo, parámetros para buscar homólogos, aplicaciones del análisis y selección del modo de análisis (automático o manual)).



Fig. II.1 Interfaz del software *ForeStereo*. En la imagen se observa la ventana de trabajo con las fotografías cargadas de un par estereoscópico de una masa de *Quercus pyrenaica* Willd. en Valsaín (Segovia) listas para ser analizadas.

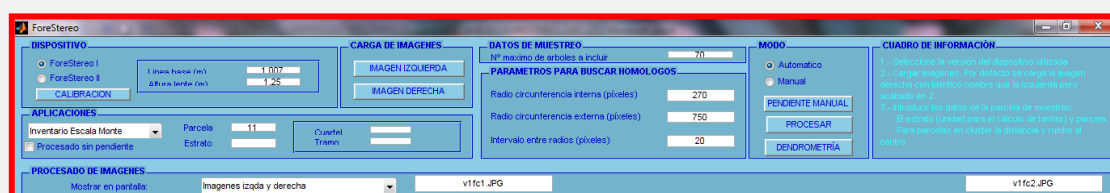


Fig. II.2 Ventana de opciones de *ForeStereo* en la que se introducen los datos de entrada.

Una vez cargadas las dos imágenes del par estereoscópico, se procede a la determinación automática de la pendiente y a la corrección de pendiente en la estimación de la altura (Fig. II.3). También cabe la posibilidad de determinar la pendiente en modo semiautomático.

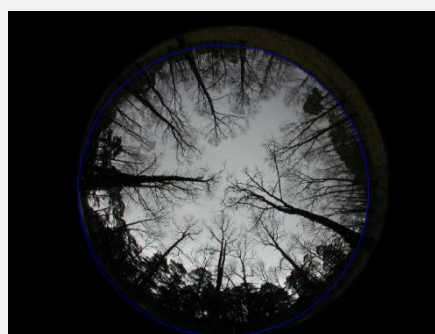


Fig.II.3 Línea de pendiente sobre la imagen activa.

Recuadro II.2 PROCESADO DE IMAGEN

A. CÁLCULO DE CRITERIOS PARA CLASIFICAR LA IMAGEN

La segmentación basada en características consiste en la identificación de los píxeles pertenecientes a una serie de texturas para su exclusión (cielo y hojas), facilitando el proceso de correspondencia de los píxeles de los fustes. Para ello, se calculan tres criterios clasificadores basados en la *intensidad*, la *varianza local radial del color* y la *fracción entre el nivel del canal del color verde respecto a la suma de los tres canales RGB (GR Ratio)*, utilizando para ello un filtro de anisotropía en la dirección radial.

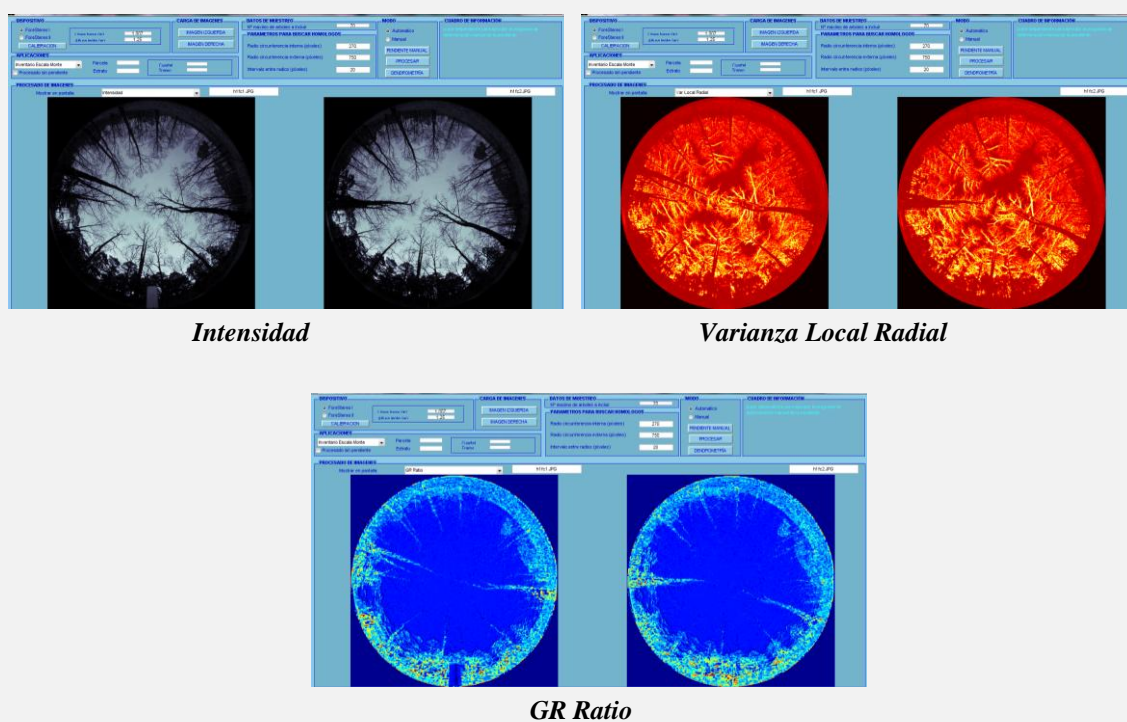


Fig. II.4 Se muestran de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha las imágenes con los criterios de Intensidad, Varianza Local Radial y GR Ratio (ratio entre el valor del canal G y la suma $R+G+B$).

Recuadro II.2 PROCESADO DE IMAGEN

B. PROCESADO

B.1. PROCESADO SEMIAUTOMÁTICO

➤ Segmentación

El proceso de segmentación sigue un proceso de “*region growing*” a partir de un punto del fuste seleccionado por el usuario, tanto hacia la base del árbol como hacia el ápice.

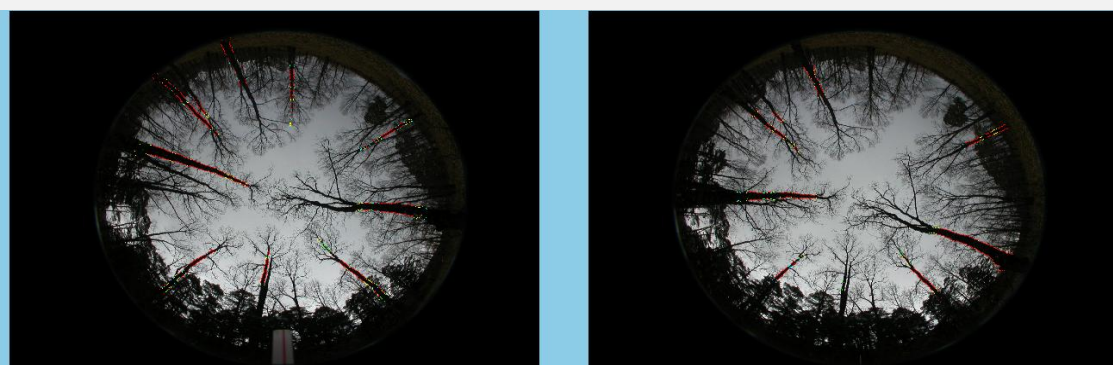


Fig. II.5 Proceso de segmentación mediante el procesado semiautomático. Los colores indican los distintos criterios clasificadores.

➤ Correspondencia

La correspondencia en este método se lleva a cabo para cada una de las regiones identificadas por el usuario como la proyección del mismo árbol en sendas imágenes. Se determinan las secciones homólogas en el fuste minimizando el error de epipolaridad.

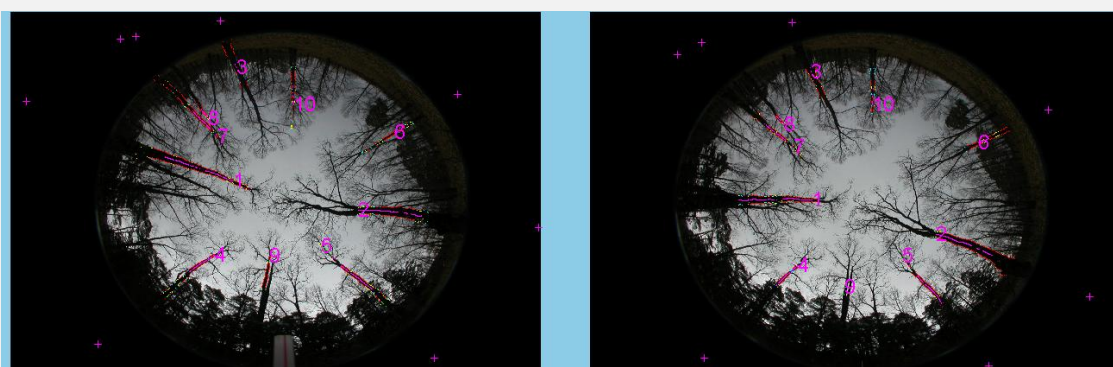


Fig. II.6 Proceso de correspondencia. En la figura se muestra el emparejamiento de características homólogas de una imagen, con las de la otra imagen del par estereoscópico, que corresponden a los fustes de los árboles.

Recuadro II.2 PROCESADO DE IMAGEN

B. PROCESADO

B.2. PROCESADO AUTOMÁTICO

➤ Segmentación

Se lleva a cabo la clasificación jerárquica, utilizando los criterios clasificadores, de todos los píxeles de la imagen en tres clases: cielo, hojas y fustes, mediante el método Otsu (Otsu,1974). La clasificación inicial se refina mediante la aplicación de los dos últimos criterios por sectores, para tener en cuenta los diferentes niveles de luminosidad en las diferentes áreas de la imagen. Posteriormente, los píxeles clasificados como pertenecientes a los fustes de los árboles se etiquetan en árboles individualizados mediante la aplicación de un muestreo de la imagen en circunferencias concéntricas.

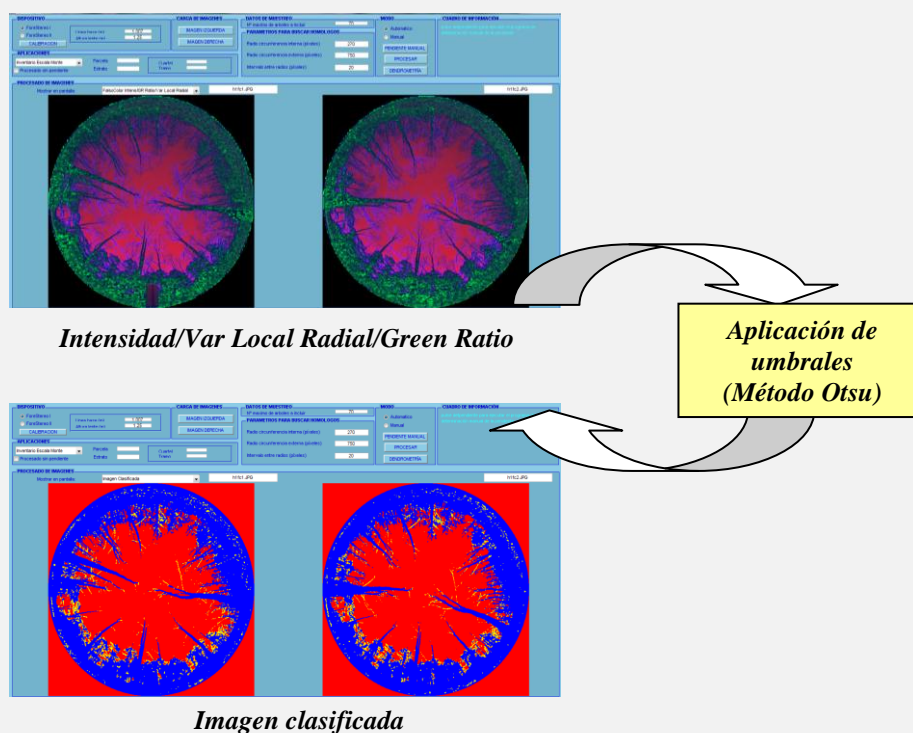


Fig. I.I.7 Proceso de segmentación aplicando el método automático. La imagen situada en el recuadro de arriba corresponde a la combinación de los 3 criterios. A partir de dicha imagen y tras la aplicación del método Otsu se obtiene la imagen clasificada.

➤ Correspondencia

El proceso de correspondencia se realiza de forma similar al descrito en el método semiautomático entre todos los pares de árboles identificados en la imagen izquierda y derecha que reúnen las condiciones para ser homólogos.

Recuadro II.2 (cont.)

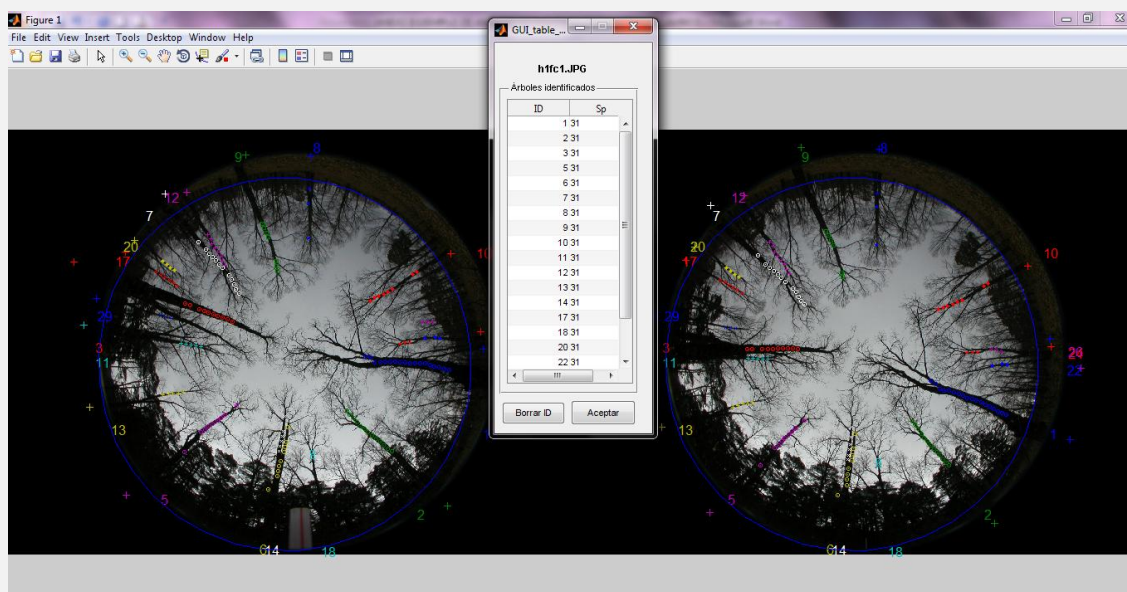


Fig. II.8 Semillas¹ homólogas. En la figura se muestran las secciones identificadas en el proceso de remuestreo como pertenecientes a cada árbol en sendas imágenes del par estereoscópico en el método automático. La aplicación genera un cuadro de texto que permite al usuario introducir el código identificativo de la especie que corresponde a cada árbol. También, permite eliminar aquellos árboles que no interesa que intervengan en el proceso de cálculo de la dendrometría, así como la posibilidad de utilizar la selección manual de los fustes de los árboles.

Después se determina cual de los posibles candidatos es el homólogo de cada árbol mediante la minimización del error medio de epipolaridad y la media de la diferencia en valor absoluto entre los diámetros estimados en ambas imágenes para todas las secciones de cada par de homólogos.

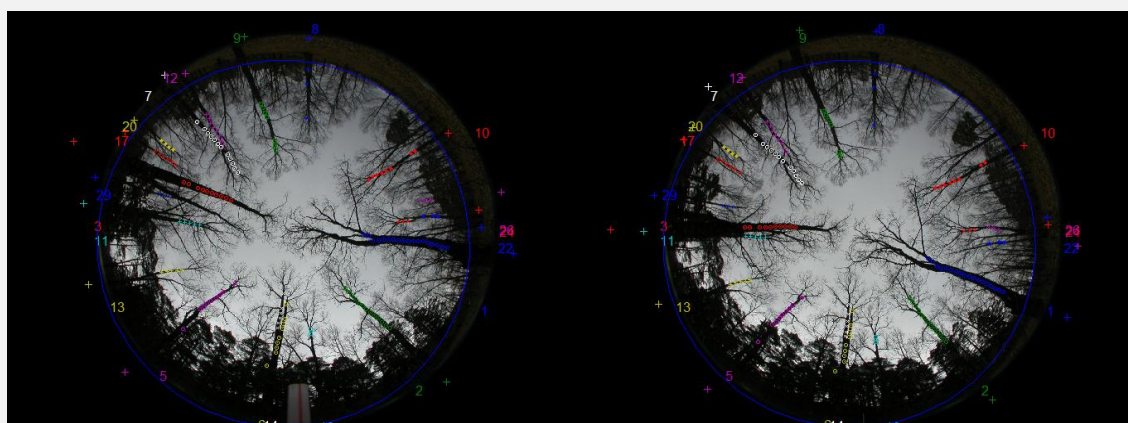


Fig. II.9 Imagen definitiva con la correspondencia de los árboles.

¹ **Semilla** es un punto a partir del cual crece una estructura que identifica la región.

Recuadro II.3 CÁLCULO DE LA DENDROMETRÍA

Una vez finalizada la correspondencia se obtiene una matriz de datos sobre la que se realiza un filtrado de mediciones erróneas y se ajustan ecuaciones de perfil (Eq. 8, véase apartado 4.1.1.3) para cada especie, a partir de las cuales se estima el diámetro a la altura de 1,30 m y el volumen de cada árbol. También se obtiene la distancia, el rumbo y la altura de la base de cada árbol, lo que permite reconstruir la disposición de los pies en 3D. Estos datos son volcados en un fichero de Excel®.

Por otra parte, la aplicación permite visualizar en 3D la imagen de los árboles (Fig. II.10), pudiendo servir de soporte para realizar visitas virtuales o mostrar la dinámica de las masas forestales. Asimismo, es posible generar un mapa de distribución espacial de los árboles en la parcela (Fig. II.11) para analizar la mezcla y el patrón espacial de las diferentes especies en cada uno de los puntos de muestreo permitiendo a su vez, desarrollar modelos que relacionen la distribución e interacciones entre especies con los factores del medio.

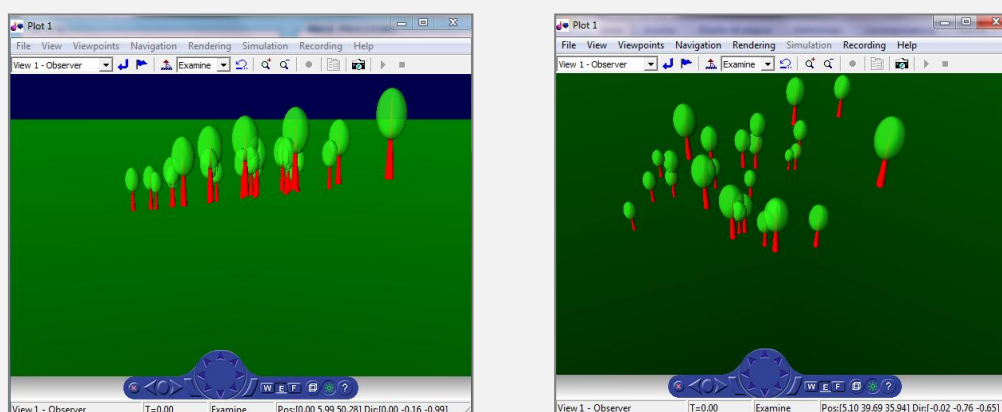


Fig. II.10 Imágenes en 3D con los árboles seleccionados tras el proceso de correspondencia.

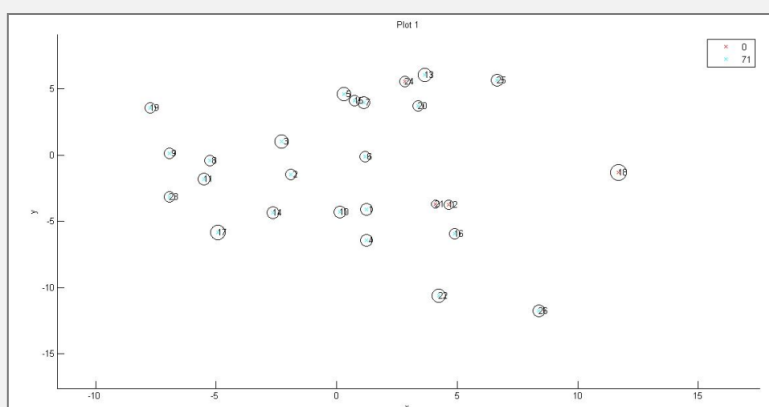


Fig. II.11 Mapa de localización de los árboles y su posición relativa respecto al resto de pies presentes en la parcela seleccionados tras la correspondencia.

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

ANEXO III

Fotografías













Nuria Simón Cid

Septiembre 2.013

The bottom of the page features a series of overlapping, semi-transparent green polygons in various shades of green, creating a modern, abstract geometric design that spans the width of the page.

ANEXO III: FOTOGRAFÍAS

Tabla III.1 Algunos ejemplos de pares de imágenes estereoscópicas hemisféricas tomadas con el dispositivo de medición MU2055-01738 en el año 2012 después de la aplicación de claras en la masa forestal (año 2011).

TRATAMIENTO	ZONA			
	DILAR ALTO		DILAR MEDIO	
CONTROL	 DA104_9s-1_1	 DA104_9s-1_2	 DM108_60s-1_1	 DM108_60s-1_2
CLARA (30%)	 DA2302_60s-1_1	 DA2302_60s-1_2	 DM1307_60s-1_1	 DM1307_60s-1_2
CLARA (50%)	 DA3509_60s-1_1	 DA3509_60s-1_2	 DM1508_60s-1_1	 DM1508_60s-1_2

Agradecimientos

Agradezco la colaboración del personal del Parque Nacional de Sierra Nevada que ha participado en la toma de datos de campo y en la creación de la base de datos forestal del Seguimiento del Cambio Global en Sierra Nevada que se ha utilizado en este estudio. También agradecer la información facilitada por el Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada y en especial, por Rut Aspizua Cantón.

Agradezco las facilidades dadas por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria para la realización de este trabajo y destacar la ayuda prestada por Cristina Rodríguez García y Enrique Garriga García.

Agradezco a Lorena Gómez Aparicio por la información proporcionada sobre la clasificación de especies.

Mi más sincero agradecimiento a mis tutores Fernando Montes Pita y Mariola Sánchez González por su profesionalidad y su continuo apoyo en la realización de este trabajo.

Por último, agradecer a José María Rey Benayas por sus valiosos comentarios que han enriquecido la versión previa de este trabajo.

El estudio ha sido posible gracias a la realización de investigaciones financiadas con fondos de los proyectos:

Programas de Investigación en la Red de Parques Nacionales (2010) 430/2011,

Plan Nacional de I+D+i (2004) AGL 2004-1941

